



Sofia Mattila

KÄYTÖSTÄ POISTETUN RENKAAN KIERRÄTETTÄVYYDEN TEHOSTAMINEN KUMIN PARTIKKELIKOKOA PIENENTÄMÄLLÄ

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 1.9.2015

Valvoja: Professori Jaana Sorvari

Ohjaajat: TkL Jyri Talja, FT Petri Peltonen

Tekijä Sofia Mattila

Työn nimi Käytöstä poistetun renkaan kierrätettävyyden tehostaminen kumin partikkeli-kokoa pienentämällä

Laitos Yhdyskunta- ja ympäristötekniikan laitos

Professuuri Ympäristötekniikka

Professuurikoodi Yhd-73

Työn valvoja Professori Jaana Sorvari

Työn ohjaajat TkL Jyri Talja, FT Petri Peltonen

Päivämäärä 1.9.2015

Sivumäärä 104+6

Kieli suomi

Tiivistelmä

Käytöstä poistettujen renkaiden kierrätettävyyden tehostaminen vaatii niiden hienontamista pienempään partikkelikokoon. Tällöin renkaiden sisältämä kumi saadaan talteen ja se voidaan hyödyntää joko sellaisenaan tai jatkokäsittelyynä (esim. devulkanoituna) uusissa korkeatasoisissa sovelluksissa. Tässä työssä tavoitteena oli tarkastella murskausmenetelmiä renkaiden hienontamiseksi, sekä selvittää devulkanoinnin mahdollisuuksia rengaskumipartikkelien jatkokäsittelyssä. Lisäksi kokeellisessa osuudessa vertailtiin renkaiden murskauslaitoksia niiden prosessi- ja tuoteominaisuuksien osalta. Tuoteominaisuuksista mielenkiinto kohdistui erityisesti kumipartikkelien muotoon ja pinnankarheuteen, sillä nämä tekijät vaikuttavat oleellisesti kumipartikkelien hyötykäyttömahdollisuuksiin.

Työn tutkimusaineisto koottiin kirjallisuuden, laitosvierailujen ja laboratoriokokeiden avulla. Laitosvierailut suoritettiin kahdella murskauslaitoksella (laitokset 1 ja 2). Laboratoriokokeissa murskauslaitoksilta saatujen kumipartikkelien muotoa ja pintakuviota tarkasteltiin korkeatasoisella Scanning Electron Microscopy (SEM) -menetelmällä ja stereomikroskoopilla.

Kokonaisten renkaiden hienontaminen kumijauheeksi tapahtuu yleensä kolmiportaisesti. Kussakin hienontamisvaiheessa on olemassa useita teknisesti erilaisia murskausmenetelmiä. Devulkanoitavan kumipartikkelin maksimikokona pidetään yleisesti noin 2,0 mm. Jos tämän kokoisen partikkelin devulkanoitumisaste halutaan kuitenkin pitää korkeana, täytyy devulkanointireaktion läpäistä partikkeli.

Laitokset 1 ja 2 erosivat toisistaan mm. murskaintyyppien ja prosessiominaisuuksien osalta. Mikroskooppitutkimusten perusteella myös laitosten kumipartikkeleissa oli silmämääräisesti havaittavissa muoto- ja pintakuviollisia eroja: laitos 1 tuotti pääasiassa karheita ja pitkänomaisia kumipartikkeleita, ja laitos 2 sileitä ja pyöreäköjiä mutta särmikkäitä kumipartikkeleita. Partikkelien pintakuviota koskevien tulosten perusteella laitoksen 2 partikkelit sopisivat sideaineen kanssa käytettäväksi, ja laitoksen 1 partikkelit muihin seoksiin. Tieto on hyödyllinen suunniteltaessa renkaiden kierrätystoimintaa.

Avainsanat rengas, kumi, kierrätys, murskaus, jauhatus, devulkanointi



Author Sofia Mattila

Title of thesis Increasing the efficiency of waste tyre recycling by reducing rubber particle size

Department Civil and Environmental Engineering

Professorship Environmental Engineering

Code of professorship Yhd-73

Thesis supervisor Professor Jaana Sorvari

Thesis advisors Lic.Sc. (Tech) Jyri Talja, PhD Petri Peltonen

Date 1.9.2015

Number of pages 104+6

Language Finnish

Abstract

To increase the efficiency of waste tyre recycling, tyres have to be shredded into a smaller particle size. In this way, the rubber in the tyre is separated and it can be used either as such or after further processing (e.g. devulcanization) in new high-value applications. In this work, the objective was to study the shredding methods of tyres and to examine opportunities of devulcanization in the processing of rubber particles. In addition, in the experimental part the process and product characteristics of two waste tyre shredding plants were compared. In product characteristics, the focus was in the shape and surface roughness of the rubber particles, as these factors significantly affect their reutilization.

Data for the research were collected using literature, onsite visits at two shredding plants (plants 1 and 2), and laboratory tests. In the laboratory tests, the shape and surface roughness of the rubber particles from two shredding plants were analyzed using a high-quality method called Scanning Electron Microscopy (SEM), and stereomicroscope.

The entire tyre can be grinded into the rubber powder usually in three steps. In each grinding step, there are several technically different shredding methods. In devulcanization, the maximum size of the rubber particle is generally about 2,0 mm. However, if the degree of devulcanization of this particle is required to be maintained at a good level, the devulcanization reaction should penetrate the particle.

The process and product characteristics in plant 1 differed from those in plant 2. Based on the microscope studies, there were also visually observable differences in the shape and roughness between shredded rubber particles: plant 1 produced mainly rough and elongated rubber particles while plant 2 produced smooth and round but edged rubber particles. According to the results of the roughness of the rubber particles, particles from plant 2 would be suitable for use with the binder, and particles from plant 1 for other mixtures. This information is useful while planning tyre recycling.

Keywords tyre, rubber, recycling, shredding, grinding, devulcanization

Alkusanat

Tämä diplomityö tehtiin Kuusakoski Oy:lle tarkoituksena kehittää renkaiden kierrätystä Suomessa tulevaisuudessa. Tätä varten työssä selvitettiin käytöstä poistettujen renkaiden murskaamiseen ja kumin devulkanointiin käytettyjä menetelmiä. Työn kokeellisessa osuudessa tutustuttiin kahteen rengasmateriaalia prosessoivaan murskauslaitokseen. Työn kokeellisen osuuden tavoitteena oli mm. selvittää millaisia prosessointimenetelmiä on käytössä ja millaista materiaalia nämä tuottavat.

Työn virallisina ohjaajina toimivat TkL Jyri Talja Kuusakoski Oy:stä ja FT Petri Peltanen Aalto-yliopistosta. Työn valvojana oli professori Jaana Sorvari Aalto-yliopistosta.

Suuret kiitokset Kuusakoski Oy:lle mielenkiintoisen diplomityön mahdollistamisesta. Kiitos myös yllä mainituille henkilöille ja muille ammattilaisille, jotka auttoivat asiantuntijuudellaan työn etenemisessä, sekä perheelleni ja ystävilleni, jotka kannustivat minua työn tekemisen aikana. Erityiskiitos kuuluu lisäksi tahoille, jotka mahdollistivat kokeellisen osuuden toteuttamisen.

Espoo 1.9.2015

Sofia Mattila

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	
Abstract	
Alkusanat	
Sisällysluettelo	5
Lyhenteet	8
Määritelmät	9
Kuvaluettelo	12
Taulukkoluettelo	14
1 JOHDANTO	15
1.1 Tutkimuksen tausta	15
1.2 Tutkimuksen tavoitteet	17
1.3 Tutkimuksen rakenne ja rajaukset	18
2 KIERRÄTYSRENGAS JA SEN KÄSITTELY	20
2.1 Kierrätysrengas materiaalina	20
2.1.1 Renkaan rakenne	20
2.1.2 Renkaan koostumus	21
2.1.3 Renkaan valmistusprosessi	24
2.1.4 Vulkanoinnin tarkoitus	25
2.2 Kierrätysrenkaan hienontaminen kumijauheeksi	26
2.2.1 Hienontamisprosessit	26
2.2.2 Hienontamisprosesseja vastaavat murskaustavat	27
2.3 Primääriprosessointilaitteet	28
2.3.1 Leikkaava murskain	28
2.3.2 Primäärinen valssimurskain	29
2.3.3 Vasaramurskain	30
2.4 Sekundääriprosessointilaitteet	31
2.4.1 Granulaattori	31
2.4.2 Kollarimurskain	32
2.4.3 Sekundäärinen valssimurskain	33
2.5 Tertiääriprosessointilaitteet	33
2.5.1 Tertiäärinen valssimurskain	33
2.5.2 Ekstruuderit	34
2.5.3 Vesisuihkumurskain	35
2.5.4 Märkämurskain	37
2.5.5 Kryomurskain	37
2.6 Kumipartikkelien devulkanointi	39
2.6.1 Devulkanointiprosessit	39
2.6.2 Sekundääriprosessoinnissa saatujen kumipartikkelien devulkanointi	43

2.6.3	Mikro- ja ultraääniaaltoihin perustuva devulkanointi	44
2.7	Kierrätysrenkaan käsittelyn ympäristövaikutukset ja taloudelliset vaikutukset.....	47
2.7.1	Murskaus- ja jauhatusmenetelmien päästöt	47
2.7.2	Murskaus- ja jauhatusmenetelmien kustannustehokkuus	50
2.7.3	Devulkanointimenetelmien päästöt.....	51
2.7.4	Devulkanointimenetelmien kustannustehokkuus.....	52
3	TUTKIMUSAINEISTO JA TUTKIMUSMENETELMÄT	54
3.1	Kirjallisuusselvitys.....	54
3.2	Laitosvierailut ja haastattelut	54
3.3	Laboratoriokokeet	55
3.3.1	Mittausten tavoite ja toteutus	55
3.3.2	Pyyhkäisyelektronimikroskoopin toimintaperiaate.....	56
3.3.3	Stereomikroskoopin toimintaperiaate	58
3.3.4	Näytteet ja näytteenotto.....	59
3.3.5	Näytteiden esikäsittely	60
4	TUTKIMUSTULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU	62
4.1	Laitosvierailujen tulokset.....	62
4.1.1	Laitoksen 1 prosessin kuvaus.....	62
4.1.2	Laitoksen 1 lopputuotteet	66
4.1.3	Laitoksen 2 prosessin kuvaus.....	68
4.1.4	Laitoksen 2 lopputuotteet	72
4.2	Laitosvierailuilla saatujen tulosten tarkastelu	74
4.2.1	Laitosten 1 ja 2 laite- ja prosessierot.....	74
4.2.2	Laitosten 1 ja 2 käyttöenergian tarpeen väliset erot.....	76
4.2.3	Laitosten 1 ja 2 lopputuotteiden määrälliset ja laadulliset erot.....	78
4.3	Laboratoriokokeiden tulokset	81
4.3.1	Laitoksessa 1 tuotettujen kumipartikkelien muoto ja pintakuvio	81
4.3.2	Laitoksessa 2 tuotettujen kumipartikkelien muoto ja pintakuvio	83
4.3.3	Referenssinäytteen muoto ja pintakuvio	84
4.4	Laboratoriokokeissa saatujen tulosten tarkastelu.....	85
4.4.1	Laitosten 1 ja 2 tuottamien kumipartikkelien pintaominaisuuksien eroavaisuudet	85
4.4.2	Laboratoriokokeissa saatujen tulosten vertailu kirjallisuustietoihin	87
4.4.3	Pintaominaisuuksien merkitys kumipartikkelien hyödynnettävyyden kannalta	88
5	JOHTOPÄÄTÖKSET	90
5.1	Renkaiden hienontaminen ja kumin devulkanointi osana niiden kierrätystoimintaa	90

5.2	Murskauslaitosten laite- ja prosessierot	91
5.3	Murskauslaitoksilla tuotettujen kumipartikkelien eroavaisuudet	92
5.4	Työn toteutumisen tarkastelu ja jatkotutkimuksen tarpeet	93
6	YHTEENVETO	95
	Lähdeluettelo	97
	Liiteluettelo	104
	Liitteet	

Lyhenteet

BR	Polybutadiene rubber, butadieenikumi
EPDM	Ethylene-propylene-diene-monomer rubber, etyleenipropeenidieenikumi
NR	Natural rubber, luonnonkumi
rpm	Revolutions per minute, kierrosta minuutissa (pyörimisnopeuden yksikkö)
SBR	Styrene-butadiene rubber, styreenibutadieenikumi
SEM	Scanning electron microscope, pyyhkäisyelektronimikroskooppi
TTY	Tampereen teknillinen yliopisto

Määritelmät

Aerobinen	Hapellinen
Agglomeroitua	Liittyä toisiinsa, kasaantua
Ambienttinen	Huoneen lämpötilassa tapahtuva
Anaerobinen	Hapeton
Depolymeroituminen	Polymeroitumisen käänteinen prosessi, jossa polymeeri hajoaa takaisin yksittäisiksi monomeereiksi
Devulkanointi	Vulkanoinnin käänteinen prosessi, jossa polymeeriketjuja sitovat ristisillat puretaan
Elastomeeri	Polymeeri, joka venyy vähintään kaksinkertaiseksi ja palautuu nopeasti alkuperäiseen muotoonsa, kun venymän aiheuttanut voima poistetaan
Elektronitykki	Elektroniputken osa, joka pitää sisällään tyhjiöön sijoitetun elektronilähteen ja elektronisuihkua säätelevän elektrodijärjestelmän
Emittoitua	Vapautua, irrota
Hajoaminen (polymeerin)	Prosessi, jossa polymeerin rakenne muuttuu esimerkiksi satunnaisen ketjun pilkkoutumisen, heikkojen sidosten katkeamisen tai ketjun päässä tapahtuvan depolymeroitumisen seurauksena
Kavitaatio	Ilmiö, jossa neste alkaa kiehua paineen laskun johdosta. Syn- tyneiden höyrykuplien romahtaminen vapauttaa suuren määrän energiaa
Kertamuovipolymeeri	Polymeeri, joka ei ole uudelleenmuokattavissa lämmön ja paineen avulla perinteisin muovin kierrätysmenetelmin; lämmitettäessä riittävästi sen verkkomainen rakenne hajoaa
Kierrätys	Toimintaa, jossa materiaali saatetaan uudelleen kiertoon valmistamalla käytöstä poistettu rengas tuotteeksi, materiaaliksi tai aineeksi joko alkuperäiseen tai muuhun tarkoitukseen. Kierrätyksenä ei pidetä toimintaa, jossa rengas hyö-

	dynnetään energiana tai valmistetaan maantäyttöön käytettäväksi aineeksi (L 17.6.2011/646, 6 §.)
Kopolymeeri	Polymeeri, joka koostuu vähintään kahdesta tai useammasta eri monomeerista
Kryogeeninen (jauhatus)	Nestetyypen avulla hyvin alhaisessa lämpötilassa (yleensä alle -80 °C) tapahtuva kumin jauhatusmenetelmä
Kumi	Seos, joka sisältää yhtä tai useampaa raakakumilaatua sekä muita ainesosia
Lasittumislämpötila	Lämpötila, jossa polymeeri muuttuu hauraaseen, lasimaiseen, olomuotoon
Luonnonkumi	Kumipuun maitiaisnesteestä saostettu raakakumi
Molekyyli	Kahden tai useamman atomin muodostama yhteenliittymä
Monomeeri	Pieni molekyyli, joka voi sitoutua kemiallisesti toisiin monomeereihin
Polymeeri	Suuri molekyyliketju, joka syntyy useiden monomeerien liittyessä toisiinsa
Polymeroituminen	Prosessi, jossa monomeerit liittyvät toisiinsa muodostaen polymeerin
Poolisuus	Molekyylin ominaisuus, jossa elektronitiheyden jakautuminen synnyttää siihen negatiivisesti ja positiivisesti varautuneet päät. Varautuneisuudesta johtuen molekyyli pystyy liikkumaan muuttuvan sähkökentän mukaan.
Primäärielektroni	Elektroni, joka on peräisin alkuperäisestä elektronisuihkusta
Primääriprosessointi	Kokonaisen renkaan murskaaminen rengasmurskeeksi (partikkelikoko 25–300 mm)
Radikaali	Atomi tai molekyyli, jolla on pariton elektronirakenne ja siksi se reagoi herkästi toisten molekyylien kanssa
Regenerointi	Prosessi, jossa tapahtuu sekä pääpolymeeriketjujen että niitä yhdistävien ristisiltojen purkautumista

Sekundäärielektroni	Elektroni, joka irtoaa primäärielektronin vaikutuksesta näytteen pinnalta
Sekundääriprosessointi	Rengasmurskeen (partikkelikoko 25–300 mm) jauhaminen kumigranulaatiksi (partikkelikoko 1–10 mm)
Sputterointi	Fysikaalinen kalvonkasvatusmenetelmä, jossa jalokaasun plasmalla pommitetaan kasvatusmateriaalia siinä olevien atomien irrottamiseksi ja siirtämiseksi halutun kasvatusalustan päälle
Synteettinen kumi	Keinotekoisesti polymeroimalla valmistettu kumimainen aines, esim. SBR kumi, jolla on elastomeerin ominaisuuksia
Sähkömagneettinen linssi	Rautakuoresta ja kuparikäämistä koostuva ”linssi”, jonka läpi kulkeva sähkövirta synnyttää sähkö- ja magneettikentän
Tertiääriprosessointi	Kumigranulaatin (partikkelikoko 1–10 mm) jauhaminen kumijauheeksi (partikkelikoko alle 1 mm)
Uudelleenkäyttö	Toimintaa, jossa käytöstä poistettu rengas käytetään uudelleen alkuperäiseen tarkoitukseensa ilman suurempaa esikäsittelyä (L 17.6.2011/646, 6 §)
Viskositeetti	Suure, joka kuvaa aineen kykyä vastustaa virtausta; mitä suurempi viskositeetti sitä enemmän aine vastustaa virtausta
Vulkanointi	Prosessi, jossa elastomeerimolekyylit sidotaan toisiinsa kemiallisin rikkisidoksin eli ristisilloin

Kuvaluettelo

Kuva 1.	Jätteiden käsittelyn etusijajärjestys.....	15
Kuva 2.	Renkaan rakenteen poikkileikkaus ja sen pääkomponentit	20
Kuva 3.	Polyisopreenin polymeroitumisreaktio.....	22
Kuva 4.	Polystyreenibutadieenin ja polybutadieenin polymeroitumisreaktiot	23
Kuva 5.	Renkaan valmistusprosessi pääpiirteittäin.....	25
Kuva 6.	Vulkanoinnissa tapahtuva kumiseoksen verkkomaisen rakenteen synty	26
Kuva 7.	Kokonaisen renkaan hienontaminen kumijauheeksi tapahtuu portaittaisesti	27
Kuva 8.	a) Havainnekuva ja b) todellinen kuva kaksiroottorisesta leikkaavasta murskaimesta	29
Kuva 9.	a) Havainnekuva valssimurskaimen rakenteesta ja toiminnasta, sekä b) todellinen kuva valssien pintakuvioista.....	30
Kuva 10.	a) Havainnekuva vasaramurskaimen rakenteesta ja toiminnasta, sekä b) todellinen kuva erään vasaramurskaimen roottorista	30
Kuva 11.	a) Havainnekuva ja b) todellinen kuva tyypillisestä granulaattorista.....	31
Kuva 12.	Kollarimurskaimen rakenne ja toimintaperiaate.....	32
Kuva 13.	Kaaviokuva a) yksiruuvisesta ekstruuderista ja b) ekstruuderikammioista.....	35
Kuva 14.	Devulkanoinnin ja regeneroinnin ero	40
Kuva 15.	Mikroaaltoihin perustuva devulkanointiyksikkö	45
Kuva 16.	Ultraääniaaltoihin perustuvassa devulkanoinnissa käytetään suuritehoisia ultraääniaaltoja yhdessä ekstruuderin kanssa	46
Kuva 17.	Philipsin XL-30 pyyhkäisyelektronimikroskooppi toiminnassa	56
Kuva 18.	Pyyhkäisyelektronimikroskoopin rakenneosat	57
Kuva 19.	Leican MZ 7.5 stereomikroskooppi.....	58
Kuva 20.	Tutkimuksessa käytetty näytteenottoprosessi.....	60
Kuva 21.	Esikäsitellyt kumipartikkelinäytteet valmiina pyyhkäisyelektronimikroskooppianalyysiin	61
Kuva 22.	Laitoksen 1 murskausprosessi	63
Kuva 23.	Laitoksessa 1 käytetty yksiroottorinen leikkaava murskain	63
Kuva 24.	Laitoksen 1 kokonaisenergiankulutuksen (451 kWh/t) jakautuminen murskaustoiminnan ja muun toiminnan kesken. Murskaustoimintaan kulutettu energia vastaa murskaimille annettujen energiankulutusten vaihteluvälien keskiarvoja.....	65
Kuva 25.	Murskaukseen käytetyn energian (275 kWh/t) jakautuminen eri laitteille ja eri prosessivaiheiden kesken. Murskaustoimintaan kulutettu energia vastaa murskaimille annettujen energiankulutusten vaihteluvälien keskiarvoja	66
Kuva 26.	Lopputuotteiden määrällinen jakautuminen laitoksella 1	67
Kuva 27.	Laitokselta 1 saatavaa a) metallia ja b) tekstiiliä	67
Kuva 28.	Laitokselta 1 saatavat kumin tuotefraktiot.....	68
Kuva 29.	Laitokselta 1 saatavien kumin tuotefraktioiden partikkelikoot	68
Kuva 30.	Laitoksen 2 murskausprosessi	69
Kuva 31.	Laitoksessa 2 käytetty kaksiroottorinen leikkaava murskain	70

Kuva 32. Laitoksen 2 kokonaisenergiankulutuksen (144 kWh/t) jakautuminen murskaustoiminnan ja muun toiminnan kesken	71
Kuva 33. Murskaukseen käytetyn energian (133 kWh/t) jakautuminen eri laitteille ja eri prosessivaiheiden kesken.....	71
Kuva 34. Lopputuotteiden määrällinen jakautuminen laitoksella 2.....	72
Kuva 35. Laitokselta 2 saatavaa a) metallia ja b) tekstiiliä.....	72
Kuva 36. Laitokselta 2 saatavat kumin tuotefraktiot.....	73
Kuva 37. Laitokselta 2 saatavien kumin tuotefraktioiden partikkelikoot	73
Kuva 38. Laitoksen 2 tuotefraktioiden jakautuminen	74
Kuva 39. Laitosten 1 ja 2 kokonaisenergiankulutukset tuotettua kumitonnia kohden...	77
Kuva 40. Energiankulutus kasvaa eksponentiaalisesti tuotetun partikkelikoon kasvaessa (laitos 2).....	77
Kuva 41. Lopputuotteiden määrällinen jakautuminen laitoksilla 1 ja 2	78
Kuva 42. Metallin (vasemmalla) ja tekstiilin (oikealla) vertailua laitosten 1 ja 2 kesken	80
Kuva 43. Pyyhkäisyelektronimikroskoopilla saatua yleiskuvaa laitoksen 1 tuottamista kumipartikkeleista	81
Kuva 44. Pyyhkäisyelektronimikroskoopilla saatua lähikuvaa laitoksen 1 tuottamista kumipartikkeleista	82
Kuva 45. Stereomikroskooppikuvat laitoksen 1 partikkeleista, jotka ovat halkaisijaltaan a) 250–500 µm, b) 500–1000 µm, c) 1000–2000 µm ja d) 2000–2800 µm...	82
Kuva 46. Pyyhkäisyelektronimikroskoopilla saatua yleiskuvaa laitoksen 2 tuottamista kumipartikkeleista	83
Kuva 47. Pyyhkäisyelektronimikroskoopilla saatua lähikuvaa laitoksen 2 tuottamista kumipartikkeleista	83
Kuva 48. Stereomikroskooppikuvat laitoksen 2 partikkeleista, jotka ovat halkaisijaltaan a) 250–500 µm, b) 500–1000 µm, c) 1000–2000 µm ja d) 2000–2800 µm...	84
Kuva 49. Pyyhkäisyelektronimikroskoopilla saatua yleiskuvaa referenssinäytteen kumipartikkeleista	85
Kuva 50. Pyyhkäisyelektronimikroskoopilla saatua lähikuvaa referenssinäytteen kumipartikkeleista	85

Taulukkoluettelo

Taulukko 1.	Renkaan palakoon vaikutus sen kierrätysvaihtoehtoihin	17
Taulukko 2.	Henkilöauton ja kuorma-/linja-auton renkaiden koostumus	22
Taulukko 3.	Kumiseoksen lisäaineita ja niiden tehtäviä.....	24
Taulukko 4.	Valssimurskaimella tuotetun kumijauheen keskimääräinen partikkelikoko ja ominaisuudet.....	34
Taulukko 5.	Ekstruuderilla tuotetun kumijauheen keskimääräinen partikkelikoko ja ominaisuudet.....	35
Taulukko 6.	Vesisuihkumurskaimella tuotetun kumijauheen keskimääräinen partikkelikoko ja ominaisuudet	36
Taulukko 7.	Märkämurskaimella tuotetun kumijauheen keskimääräinen partikkelikoko ja ominaisuudet	37
Taulukko 8.	Kryomurskaimella tuotetun kumijauheen keskimääräinen partikkelikoko ja ominaisuudet.....	38
Taulukko 9.	Devulkanointimenetelmät niiden toimintaperiaatteen mukaan jaoteltuna ..	41
Taulukko 10.	Devulkanointimenetelmät niissä tapahtuvan reaktion vaikutusalueen mukaan jaoteltuna.....	44
Taulukko 11.	Laboratoriokokeiden toteutus	56
Taulukko 12.	Pyyhkäisyelektronimikroskoopilla tutkitut näytteet.....	59
Taulukko 13.	Stereomikroskoopilla tutkitut näytteet	59
Taulukko 14.	Sarjaan asennettujen granulaattorien 1 ja 2 ominaisuuksia.....	64
Taulukko 15.	Laboratoriossa tutkittujen näytteiden muoto ja pintakuvio	86

1 JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tausta

Suomessa renkaiden käsittelystä säädetään jätelaissa 646/2011 sekä sitä tarkentavassa käytöstä poistettujen renkaiden erilliskeräystä ja hyödyntämistä koskevassa valtioneuvoston asetuksessa 527/2013 (Suomen Rengaskierrätys Oy_a). Jätelaissa määritellään yleiset jätteitä koskevat velvoitteet, joita valtioneuvoston asetus tarkentaa. Renkaita tarkasteltaessa jätelain yhtenä tärkeimpänä velvoitteena voidaan pitää jätteiden käsittelyn etusijajärjestystä eli jätehierarkiaa (Kuva 1). Etusijajärjestyksen mukaan paras ratkaisu jätteiden käsittelemiseksi olisi syntyvän jätteen määrän vähentäminen. Jos jätettä kuitenkin syntyy, tulisi se ensisijaisesti valmistella uudelleenkäyttöä varten ja toissijaisesti kierrättää. Kolmas vaihtoehto on jätteen hyödyntäminen muilla tavoin, kuten polttamalla. Tätä seuraa jätteen loppusijoittaminen kaatopaikalle. (L 17.6.2011/646, 8 §.) Renkaiden käsittelyä koskevan valtioneuvoston asetuksen merkittävimpänä velvoitteena voidaan puolestaan pitää tavoitetta hyödyntää käytöstä poistuvista renkaista vähintään 95 paino-% joka vuosi. (VNp 27.6.2013/527, 1 §, 2 §).



Kuva 1. Jätteiden käsittelyn etusijajärjestys (L 17.6.2011/646, 8 §).

Vuonna 2014 Suomessa syntyi kaikkiaan noin 49 800 tonnia käytöstä poistettuja ajoneuvojen renkaita (Suomen Rengaskierrätys Oy_b). Näistä renkaista noin 2 % valmisteltiin renkaiden pinnoituksen avulla uudelleenkäyttöön ja noin 7 % kierrätettiin, pää-

asiassa räjähdysmatoissa, painoissa, törmäyssuojissa, maneeseissa ja tekonurmikentissä. Muun hyödyntämisen osuus oli noin 87 %. Muu hyödyntäminen jakaantui maanrakennustoimintaan (noin 69 %) ja energiahyödyntämiseen (noin 18 %). Maanrakentaminen koostui pitkälti kaatopaikkojen pintarakenteista ja meluvalleista. Energiahyödyntäminen tapahtui suurimmaksi osaksi sementtitiineissä. Jäljelle jäänyt noin 4 % vastaanotetuista renkaista vietiin hyötykäyttöön ulkomaille tai varastoitiin. (Suomen Rengaskierrätys Oy_b; Kuusakoski Oy 2014).

Kuten vuoden 2014 tilastoistakin on nähtävissä, Suomessa renkaita on hyödynnetty jo useamman vuoden ajan valtioneuvoston asetuksen velvoittaman hyötykäyttöasteen mukaisesti, jolloin renkaita on sijoitettu kaatopaikalle vain vähäisissä määrin (Suomen Rengaskierrätys Oy_b). Jätelain nojalla annettua viisiportaista jätehierarkiaa tarkasteltaessa renkaiden hyödyntämisessä olisi Suomen tapauksessa kuitenkin yhä parantamisen varaa, sillä kyseinen hyödyntämistoiminta ei ole kovin pitkälle jalostettua. Nykyisissä hyödyntämisratkaisuissa korkean teknologian renkaat käytetäänkin pitkälti sovelluksiin, joissa voitaisiin käyttää huomattavasti heikompileaattuisia materiaaleja. Kierrätyksen tehostamiseksi renkaat tulisi hyödyntää sovelluksissa, jotka vastaavat laadultaan kierrätysrenkaiden alkuperäistä laatua. (Saiwari 2013, 2.) Näin ollen teoriassa paras ratkaisu renkaiden kierrättämiseksi olisi käyttää renkaissa oleva kumi uuden kumituotteen valmistuksessa (De et al. 2005, 248). Tällöin voidaan saavuttaa maksimaalinen hyöty ympäristön suojelemiseksi ja raaka-aineiden säästämiseksi (Li et al. 2012, 1).

Kumin monimutkaisesta rakenteesta johtuen renkaan kierrättäminen ei ole mahdollista tavallisilla liuotus- tai sulatusratkaisulla (De et al. 2005, 247–248). Tämän vuoksi renkaan hyödyntäminen muissa kuin maanrakennuskohteissa, esimerkiksi uusiotuotteissa, voidaan toteuttaa ainoastaan hienontamalla rengas riittävän pieneen partikkelikokoon (Taulukko 1) (Li et al. 2012, 1). Partikkelikoon pienentäminen tapahtuu portaittaisesti ja käytettävissä on useita eri menetelmiin perustuvia murskaus- ja jauhatuslaitteita. On tärkeää tuntea renkaan hienontamiseksi käytetyt tekniikat, koska menetelmästä riippuen tuotetun kumimateriaalin ominaisuudet vaihtelevat ja täten myös niiden soveltuvuus erilaisiin tuotteisiin voi vaihdella. Käytetystä murskaus- tai jauhatusmenetelmästä riippuvia kumipartikkelin ominaisuuksia ovat mm. partikkelikokojakauma sekä partikkelin muoto, pintaominaisuudet ja puhtausaste. (De et al. 2005, 128, 215, 217.)

Taulukko 1. Renkaan palakoon vaikutus sen kierrätysvaihtoehtoihin (European Tyre Recycling Association 2013, 7, 11–16).

Kierrätysrenkaan palakoko	Esimerkkejä käyttökohteista
Kokonainen rengas	Aallonmurtajat, keinotekoiset riutat, meluvallit, padot, pengerrykset, teiden perustukset, törmäyssuojat
Rengasmurske (~ 25–300 mm)	Kaatopaikkarakenteet, lämpöeristeet, salaojitukset, teiden ja urheilukenttien perustukset
Kumigranulaatti (~ 1–10 mm)	Leikki- ja urheilukenttien pintaratkaisut, lämpö- ja äänieristeet, suojamatot, tekonurmikentät
Kumijauhe (~ 0–1 mm)	Asfaltti, auton osat, jalkineet, pinnoitteet, renkaat, tieliikennekalusteet, tiivisteet, urheilutarvikkeet

Useimmissa korkeatasoisissa kierrätysratkaisuisissa murskauksessa tuotetut pienet kumipartikkelit sekoitetaan toisiin aineisiin, jolloin kumin elastiset ominaisuudet voidaan siirtää uusiin tuotteisiin. Näissä tapauksissa kumi lisätään haluttuun seokseen joko sellaisenaan tai jatkokäsittelynä. Jatkokäsittelyllä tarkoitetaan prosessia, jossa kumipartikkelien pinta aktivoidaan fysikaalisen ja kemiallisen kiinnittymisen parantamiseksi. Jatkokäsittelyn seurauksena syntyy tasaisempi ja kestävämpi seos kuin ei-jatkokäsittelyjä kumipartikkeleita käytettäessä. (De et al. 2005, 128–149.) Eräs keino kumipartikkelien jatkokäsittelemiseksi on devulkanointi, jossa partikkelin pinnan aktivointi tapahtuu samalla, kun rengaskumi palautetaan alkuperäiseen muotoonsa niin rakenteellisesti kuin laadullisestikin (Saiwari 2013, 2–3, 16).

1.2 Tutkimuksen tavoitteet

Diplomityön tavoitteena oli koota yhteen ja vertailla kierrätysrenkaan hienontamiseksi olemassa olevia menetelmiä sekä tutkia devulkanoinnin soveltuvuutta rengaskumin jatkokäsittelymenetelmänä. Devulkanoinnin osalta oltiin erityisen kiinnostuneita menetelmään soveltuvan kumipartikkelin maksimaalisesta palakoosta, sillä prosessiin syötettävää palakokoa suurentamalla devulkanointia edeltäviä prosessivaiheita voitaisiin mahdollisesti vähentää ja täten tuotantokustannuksia minimoida.

Kokeellisessa osuudessa keskityttiin kahteen kumigranulaattia tuottavaan murskauslaitokseen. Laitoksia vertailtiin 1) prosessien toiminnan ja 2) tuotettujen kumipartikkelien ominaisuuksien osalta. Prosessin toimintaa kuvaavista tekijöistä vertailujen kohteena

olivat erityisesti käytettyjen murskainten määrä, huoltotarve ja energiankulutus sekä prosessin seurauksena saatujen lopputuotteiden määrä ja laatu. Kumipartikkelien osalta tarkempi mielenkiinto kohdistui niiden muotoon ja pinnankarheuteen, sillä nämä kaksi ominaisuutta voidaan ajatella palakoon ohella tärkeimmiksi tekijöiksi kumipartikkelien mahdollisia hyötykäyttösovelluksia tarkasteltaessa.

Tavoitteena työssä oli tehostaa käytöstä poistettujen renkaiden kierrätystä Suomessa. Tutkimuksen tulosten odotetaan toimivan päätöksenteon työkaluna esimerkiksi investoinneissa.

Diplomityötä ohjaavat tutkimuskysymykset olivat seuraavat:

- Millä menetelmillä kokonainen rengas voidaan hienontaa halkaisijaltaan alle 1 mm kokoiseksi kumijauheeksi?
- Mikä on devulkanoitavan kumipartikkelin maksimikoko? Miten kumipartikkelin koon kasvattaminen vaikuttaa käytettyyn devulkanointimenetelmään?
- Miten kahden eri murskauslaitoksen prosessit, murskausteknologiat ja tuotteet eroavat toisistaan?

1.3 Tutkimuksen rakenne ja rajaukset

Tutkimuksen teoriaosuudessa tutustuttiin renkaan rakenteeseen, tarkkaan koostumukseen sekä renkaan valmistusprosessiin siltä osin kuin se oli työn kannalta relevanttia. Lisäksi teoriaosuudessa selvitettiin yleisimmät menetelmät kierrätysrenkaan hienontamiseksi sekä kumipartikkelien devulkanoimiseksi. Teoriaosuuden lopussa kierrätysrenkaiden käsittelymenetelmät koottiin yhteen oleellisimpien ympäristövaikutusten ja taloudellisten vaikutusten perusteella.

Diplomityön pääpaino pidettiin tavanomaisen henkilöauton renkaassa, joka on valmistettu rikkivulkanoinnin avulla ja jonka tärkein lisäaine on noki, sillä tällaisia renkaita katsotaan olevan maailmassa määrällisesti eniten. Lisäksi kierrätysrenkaiden rakenteesta ja koostumuksesta puhuttaessa ei huomioitu käytön aikana renkaan pinnalle tarttuvaa tai renkaassa jo valmiiksi olevaa likaa, kiviä, nastoja, liimaa tai muuta vastaavaa, sillä niiden määrä ja vaikutus renkaiden kierrätettävyyteen katsottiin olevan pieni. Renkaiden

kierrätyksestä puhuttaessa keskityttiin kumiin, ei niinkään renkaiden sisältämien vahvikemateriaalien kierrätykseen.

Työssä murskaus- ja jauhatuslaitteita käsiteltiin yleisesti, sillä markkinoilla on useita samaan menetelmään perustuvia laitteita, jotka kuitenkin poikkeavat prosessiominaisuuksiensa ja lopputuotteidensa osalta aina hieman toisistaan. Pelkästään yhdellä laitevalmistajalla voi olla useampia samaan menetelmään perustuvia laitteita. Työssä samaan prosessointivaiheeseen kuuluvista laitteista pyrittiin kokoamaan aina samat tiedot, jotta laitteiden vertailu ja tasavertainen tarkastelu olisi mahdollista. Primääriprosessointilaitteisiin ei paneuduttu niin paljoa, sillä niillä ei ole juuri vaikutusta lopullisen jauheen ominaisuuksiin.

Työn tutkimusosa alkaa luvusta kolme. Tutkimusosassa suoritettiin laitosvierailuja kahdella kumigranulaattia tuottavalla murskauslaitoksella sekä tehtiin laboratoriokokeita pintaominaisuususerojen selvittämiseksi eri laitoksilta saaduilla kumipartikkeleilla. Keskeisimpänä tutkimusmenetelmänä kuvattiin pyyhkäisyelektronimikroskooppi. Työn lopussa analysoitiin laitosvierailujen ja laboratoriokokeiden tuloksia sekä esitettiin työn johtopäätökset ja jatkotutkimuksen tarpeet.

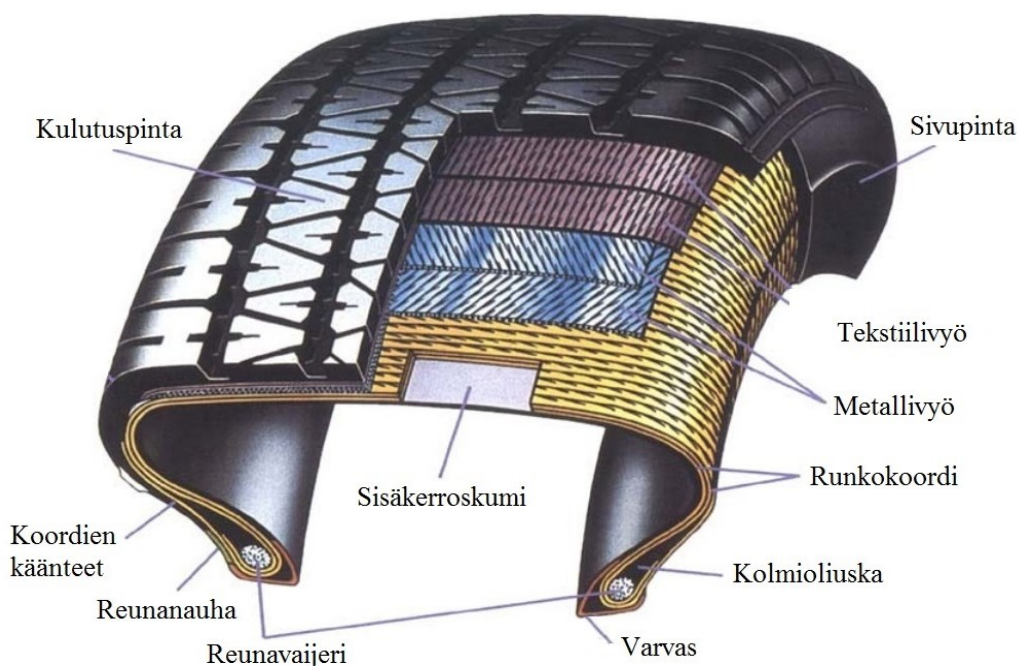
Kokeellisen osuuden tuloksia pyrittiin raportoimaan laajasti ja laitoksesta riippumatta yhtenevin osin. Selvitys ei kuitenkaan ole tältä osin täysin kattava johtuen vierailujen kohteena olleiden laitosten halusta pitää jotkin prosessin toimintaa kuvaavat tiedot yrityksen omina tietoina.

2 KIERRÄTYSRENGAS JA SEN KÄSITTELY

2.1 Kierrätysrengas materiaalina

2.1.1 Renkaan rakenne

Rengas on monimutkainen tekninen tuote, jonka rakenne on suunniteltu takaamaan hyvä suorituskyky, kestävyys ja turvallisuus. Tämän vuoksi rengas koostuukin monista kumi-, metalli- ja tekstiilikomponenteista, jotka yhdessä luovat renkaalle sen kerroksellisen rakenteen (Kuva 2). Renkaassa kumi muodostaa näkyvän osan, joka ottaa vastaan kulutusta ja lisää renkaan joustavuutta. Metallia ja tekstiili puolestaan toimivat renkaan sisällä kumin vahvikeosina niiden alhaisen venyvyyden johdosta. Vahvikeosina metalli ja tekstiili esimerkiksi estävät rengasta venymästä nopeudesta aiheutuvien keskipakoisvoimien seurauksena tai suojaavat tiettyjä renkaan osia rikkoutumiselta käytön aikana. Metallia ja tekstiiliä on kaikkialla renkaan ympärillä. (Erman et al. 2013, 656–658.)



Kuva 2. Renkaan rakenteen poikkileikkaus ja sen pääkomponentit (Muokattu lähteestä Erman et al. 2013, 656).

Yhdessä renkaassa voi olla noin 10–30 erilaista komponenttia. Kuvassa 2 on esitetty näistä vain muutamia tärkeitä. Renkaassa olevien metalli- ja tekstiilikomponenttien määrä riippuu rengassovelluksesta. Tavallisen henkilöauton renkaasta löytyy kuitenkin

aina molempia. Metallia käytetään esimerkiksi reunavaijereissa ja metallivöissä, tekstiiliä tekstiilivöissä ja varpaassa (ks. Kuva 2). Runkokoordeissa ja niiden käänteissä voidaan käyttää joko metallia tai tekstiiliä. (Erman et al. 2013, 656–658.)

Metalli esiintyy renkaassa kumipäällysteisinä metallilankoina, jotka koostuvat useammista yhteen kierretyistä ohuista metallisäikeistä. Yhden säikeen halkaisija on noin 0,15–0,40 mm. Säikeitä voidaan sitoa yhteen vaihtelevia määriä sen mukaan, kuinka paksua metallilankaa halutaan käyttää. Ohuemmilla langoilla on parempi väsymiskestävyys, kun taas paksummat langat ovat jäykempiä. Paksumpia metallilankoja käytetään enemmän suurissa renkaissa, kuten raskaiden kuorma-autojen renkaissa. (Erman et al. 2013, 672–674.)

Tekstiili esiintyy renkaassa kumipäällysteisinä kudoksina, jotka on valmistettu tekstiililangasta. Tekstiililanka koostuu yhteen kierretyistä tekstiilisäikeistä. Yleensä yhteen kierrettäviä tekstiilisäikeitä on kolme, sillä tällaisella langalla on kokemuksen mukaan paras kestävyys. (Erman et al. 2013, 680–681.)

2.1.2 Renkaan koostumus

Renkaan koostumus vaihtelee rengasvalmistajan sekä rengassovelluksen ja sen haluttujen käyttöominaisuuksien mukaan. Yleisesti voidaan kuitenkin sanoa, että renkaan painosta suurin osa on aina kumia, jolloin metallin ja tekstiilin määrä jää vähäisemmäksi. (European Tyre Recycling Association 2013, 2.) Renkaissa käytetty metalli on pääasiassa messinkipäällysteistä terästä, ja tekstiili puuvillaa, viskoosia, nailonia, polyesteria, lasikuitua tai aramidia (Erman et al. 2013, 671–672). Kumi puolestaan on seos, josta yli puolet on raakakumia ja loppu on erilaisia lisäaineita. Lisäaineista merkittävin on täyteaineena käytetty hiilipitoinen noki. (Ciesielski 1999, 32; European Tyre Recycling Association 2013, 2.)

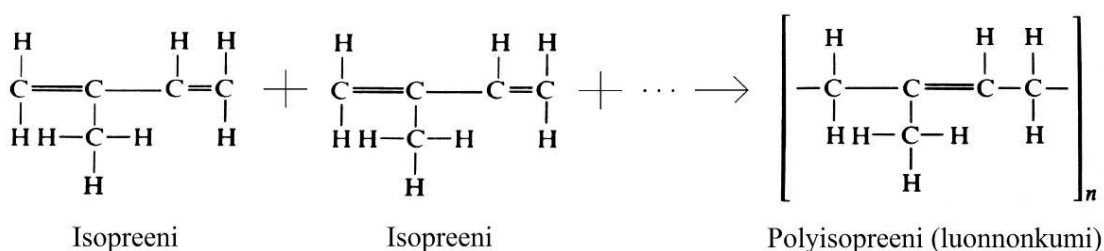
Taulukossa 2 on esitetty henkilöauton sekä vertailtavuuden vuoksi kuorma-/linja-auton renkaiden pelkistetty koostumus. Taulukkoa 2 tarkasteltaessa on hyvä huomioda, että kyseessä ovat karkeat painoprosenttiosuudet, jolloin 0-arvo (0 p-%) ei suoranaisesti kerro sitä, etteikö myös kuorma-/linja-auton renkaissa voisi olla jonkin verran tekstiiliä. Metallin määrän kasvaessa kevyen tekstiilin osuus jää vain massatarkastelussa häviävän pieneksi.

Taulukko 2. Henkilöauton ja kuorma-/linja-auton renkaiden koostumus (European Tyre Recycling Association 2013, 2).

Materiaali	Renkaan koostumus [paino-%]	
	Henkilöauto	Kuorma-/linja-auto
Kumi	80	75
Raakakumi	48	45
Lisäaineet	32	30
Noki	22	22
Muut lisäaineet	10	8
Metalli	15	25
Tekstiili	5	0

Kumiseoksessa käytetty raakakumi voi olla luonnonkumia, NR (engl. natural rubber), tai synteettistä kumia (Martinez et al. 2013, 181). Raakakumin laadusta riippumatta siitä voidaan käyttää yleisnimeä elastomeeri, sen elastisen polymeerirakenteen perusteella (Seppälä 1997, 204–205). Auton renkaan kumiseoksessa ei käytetä vain yhtä raakakumilaatua, vaan se on sekoitus luonnonkumia ja erilaisia synteettisiä kumeja (Martinez et al. 2013, 181). Nokian Renkailla noin puolet renkaan raaka-aineena käytetystä raakakumista on luonnonkumia ja puolet synteettistä kumia (Nokian Renkaat_a).

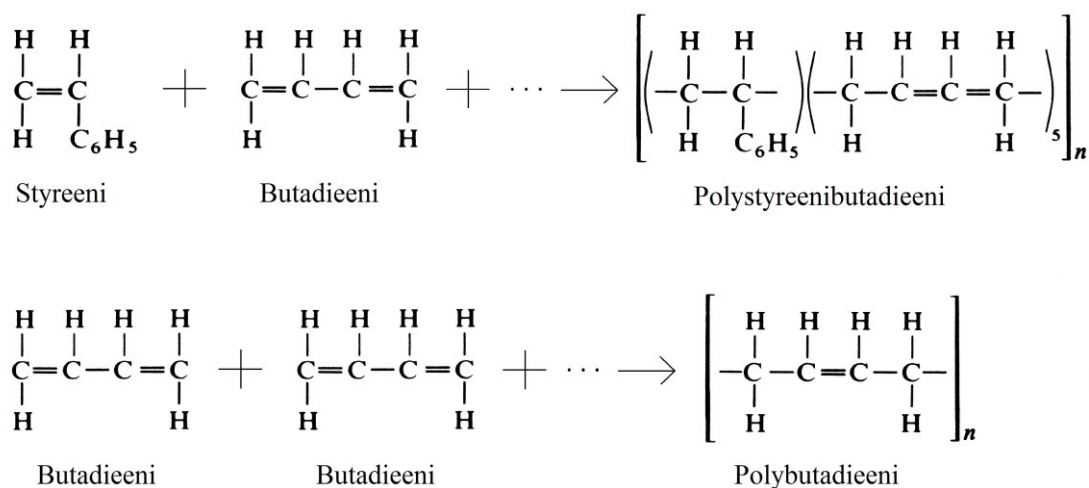
Luonnonkumi on isopreenin, C_5H_8 , polymeroitumistuote (Kuva 3). Tämä polymeroitumistuote on nimeltään polyisopreeni, $(C_5H_8)_n$, ja se syntyy luonnossa itsestään, kun isopreenimolekyylit liittyvät toisiinsa. (Simpson 2002, 27, 41.) Polymeroitumisessa isopreenimolekyylin päässä oleva, kaksi hiiliatomia yhdistävä kaksoissidos purkautuu ja ulommainen hiiliatomi linkittyy toisen samanlaisen isopreenimolekyylin hiiliatomiin. Kyseisen reaktion tapahtuessa monta kertaa, syntyy jopa tuhansista monomeereista koostuva polymeeri. (Ciesielski 1999, 103.)



Kuva 3. Polyisopreenin polymeroitumisreaktio (Muokattu lähteestä Morton 1987, 5).

Synteettisiä kumilaatuja on lukuisia, ja jokaisella niistä on hieman toisistaan poikkeavia ominaisuuksia. Renkaiden valmistuksen kannalta tärkeimmät synteettiset kumilaadut ovat SBR eli styreenibutadieenikumi (engl. styrene-butadiene rubber) ja BR eli butadienikumi (engl. polybutadiene rubber). (Ciesielski 1999, 16–26; Martinez et al. 2013, 181; Morton 1987, 13, 209.)

SBR on styreenin, C_8H_8 , ja butadienin, C_4H_6 , yhteispolymeroinnin tuote, polystyreenibutadieeni, jonka rakennekaava on $[(C_4H_6)_5(C_8H_8)]_n$. Koska SBR sisältää useampaa kuin yhtä monomeeria, siitä voidaan käyttää myös nimeä kopolymeeri. Butadienikumi (BR) koostuu luonnonkumin tapaan vain yhdestä monomeerista, butadienimolekyylistä, C_4H_6 , jota polymeroimalla saadaan polybutadieenia, $(C_4H_6)_n$. (Morton 1987, 6–7, 13, 209.) Kuvassa 4 on esitetty polystyreenibutadienin ja polybutadienin rakennekaavat sekä niiden muodostuminen.



Kuva 4. Polystyreenibutadienin ja polybutadienin polymeroitumisreaktiot (Muokattu lähteestä Morton 1987, 6–7, 18–19).

Renkaan kumiseoksessa voidaan käyttää jopa yli sataa erilaista orgaanista ja epäorgaanista lisäainetta (Martinez et al. 2013, 181). Yleensä kuitenkin yhden renkaan valmistukseen käytetään kerrallaan enintään 30 eri yhdistettä (Goodyear 2012). Lisäaineet ovat kumiseoksessa tärkeitä, sillä ne vaikuttavat pitkälti renkaan valmistusprosessiin ja täten valmiin renkaan ominaisuuksiin (Ciesielski 1999, 33–42). Taulukkoon 3 on koottu renkaissa yleisesti käytettyjä lisäaineita. Nämä lisäaineet on jaettu käyttötarkoituksensa mukaan seitsemään luokkaan.

Taulukko 3. Kumiseoksen lisäaineita ja niiden tehtäviä (Morton 1987, 22, 41–57; Sepälä 1997, 216–218).

Lisäaineryhmä	Lisäaineryhmän tehtävä
Vulkanointiaineet Esim. rikki (S), sinkkioksidi (ZnO), lyijymonoksidi (PbO)	Mahdollistavat kumin vulkanoinnin, jossa elastomeerien välille muodostuu ristisidoksia ja näin syntyy kumin fysikaalisia ominaisuuksia parantava kolmiulotteisen verkkorakenne.
Kiihdytinaineet Esim. sulfoamidit, di-tiokarbonaatit, ksantaatit	Kiihdyttävät vulkanointiprosessia ja alentavat siihen tarvittavaa lämpötilaa.
Aktivaattorit Esim. sinkkioksidi (ZnO), lyijymonoksidi (PbO), steariinihappo (C ₁₈ H ₃₆ O ₂)	Tehostavat kiihdytinaineiden toimintaa ja parantavat kumin fysikaalisia ominaisuuksia.
Suoja-aineet Esim. antioksidantit, antiotsonantit	Hidastavat kumin ikääntymistä ja parantavat sen kestävyyttä esimerkiksi happea, otsonia, valoa ja lämpöä vastaan.
Pehmittimet Esim. mineraaliöljy	Pehmittävät kumia ja lisäävät sen kylmänkestävyyttä.
Täyteaineet Esim. noki, piidioksidi (SiO ₂), kalsiumkarbonaatti (CaCO ₃), savi	Lisäävät kumin jäykkyyttä ja mekaanista kestävyyttä. Täyteaineilla voidaan lisäksi vaikuttaa kumin väriin (esim. noki tekee kumista mustan) ja kustannuksiin.
Sekalaiset aineet	Vaikuttavat vaihtelevasti valmiin kumin ominaisuuksiin ja valmistusprosessiin. Esimerkiksi hidastimet (mm. salisyylihappo (C ₇ H ₆ O ₃)) estävät raakakumin ennenaikaisen vulkanoitumisen sekoitusvaiheessa.

2.1.3 Renkaan valmistusprosessi

Renkaan valmistusprosessi voidaan tiivistää Kuvan 5 mukaisesti neljään päävaiheeseen: kumiseoksen valmistukseen, komponenttivalmistukseen, kokoonpanoon ja paistoon. Kuvassa 5 renkaan valmistus näyttää melko yksinkertaiselta menetelmältä, mutta tarkasteltaessa sitä lähemmin, se on monimutkainen ja suurta tarkkuutta vaativa prosessi.

(Nokian Renkaat_b.) Liitteessä (Liite 1) on esitetty yksityiskohtaisempi kaavio renkaan valmistusprosessista.



Kuva 5. Renkaan valmistusprosessi pääpiirteittäin (Muokattu lähteestä Nokian Renkaat_b).

Valmistusprosessin ensimmäisessä vaiheessa raaka-aineista valmistetaan kumisekoituksia, joita käytetään rengasvalmistuksen komponentteihin ja niiden kumittamiseen. Kumiseosten valmistuksessa käytetään tarkkoja reseptejä juuri oikeiden kumin ominaisuuksien saavuttamiseksi. (Nokian Renkaat_b.) Kumiseosten valmistus tapahtuu korkeassa lämpötilassa, ja prosessista voidaan erottaa kaksi vaihetta: 1) muokkaaminen eli mastisointi ja 2) homogenisointi. Mastisoinnissa raakakumi pehmennetään mekaanisesti sopivan viskositeetin omaavaksi seokseksi. Homogenisoinnissa lisäaineet lisätään määrättyssä järjestyksessä ja ne sekoitetaan tasaisesti raakakumin joukkoon. (Ciesielski 1999, 49–57; Laurila 2007, 107–108.)

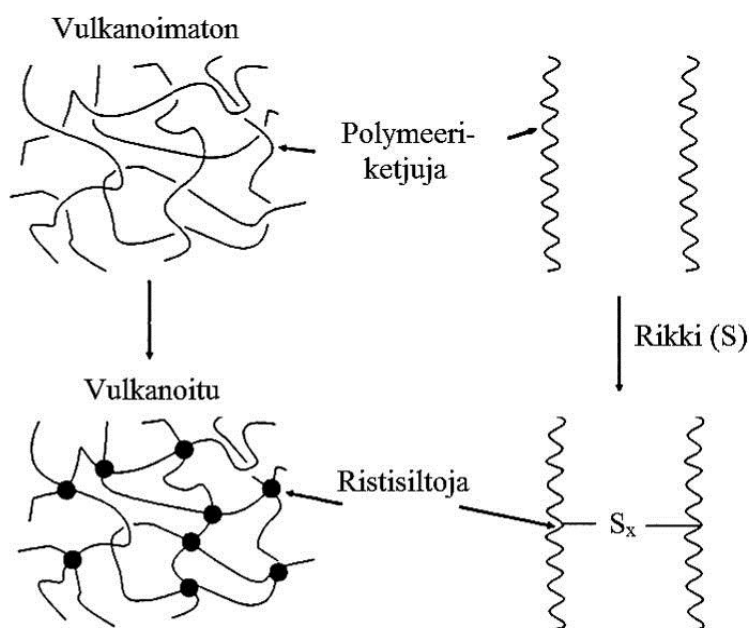
Komponenttivalmistuksessa kumiseoksista, metallista ja tekstiilistä valmistetaan erilaisia komponentteja, jotka kokoonpanossa yhdistetään toisiinsa komponenttikoneella. Näin muodostuu lopullista rengasta muistuttava raakarengas, joka on kuitenkin vielä pehmeää ja muovailtavissa, eikä täten sovellu ilman lisäkäsittelyä käyttöön. (Nokian Renkaat_b.)

Renkaan valmistusprosessin viimeisenä vaiheena on paisto, joka tapahtuu renkaalle rakennetussa muottikoneessa tietyssä paineessa ja lämpötilassa (Laurila 2007, 168). Paistossa vulkanoidaan kumi (Nokian Renkaat_b), mahdollistetaan metallikomponenttien tiukka kiinnittyminen kumiseokseen (Erman et al. 2013, 674) sekä painatetaan renkaan pintakuviot ja sivupintamerkinnot (Nokian Renkaat_b).

2.1.4 Vulkanoinnin tarkoitus

Paistossa tapahtuvalla kumin vulkanoinnilla tarkoitetaan prosessia, jossa kumiseoksessa olevien elastomeerien välille syntyy yhden tai useamman rikkiatomin pituisia ristisilto-

ja. Ristisiltojen muodostuessa kumiseos saa lopullisen kolmiulotteisen verkkomaisen rakenteensa, jolla on paremmat elastisuus- ja kestävyysominaisuudet. (Laurila 2007, 84–88.) Tätä kolmiulotteista kumiseosta kutsutaan myös nimellä kertamuovipolymeeri, sillä kyseinen kumiseos on muovailtavissa vain kerran. Näin ollen vulkanoitua kumia ei ole mahdollista sulattaa tai muovailia uudelleen lämmön avulla, vaan riittävästi kuumennettaessa tuote hajoaa eli sen molekyyli rakenne muuttuu. (Höök 2014, 1–2.) Kuvassa 6 on esitetty kumiseoksen vulkanointiprosessin periaate.

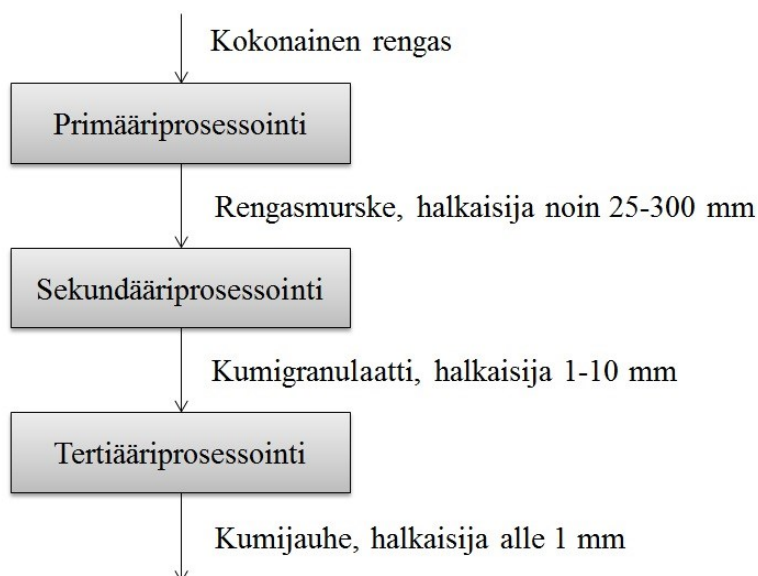


Kuva 6. Vulkanoinnissa tapahtuva kumiseoksen verkkomaisen rakenteen synty (Muokattu lähteestä Erman et al. 2013, 338).

2.2 Kierrätysrenkaan hienontaminen kumijauheeksi

2.2.1 Hienontamisprosessit

Kokonaisen renkaan hienontaminen pienempään partikkelikokoon on monivaiheinen prosessi, joka voidaan jakaa Kuvan 7 mukaisesti primääri-, sekundääri- ja tertiääriprosessointiin (De et al. 2005, 55–69). Renkaiden hienontamisprosessin jako kolmeen vaiheeseen on yleisesti käytössä, mutta rajanveto partikkelikokojen suhteen on liukuva.



Kuva 7. Kokonaisen renkaan hienontaminen kumijauheeksi tapahtuu portaattaisesti.

2.2.2 Hienontamisprosesseja vastaavat murskaustavat

Primääri-, sekundääri- ja tertiääriprosessointivaiheissa on mahdollista käyttää useita erilaisia murskaimia, jotka voivat perustua leikkaavaan, repivään tai korkean iskuvoiman menetelmään. Yleisimmin käytetyt primääri-, sekundääri- ja tertiääriprosessointilaitteet on esitetty luvuissa 2.3, 2.4 ja 2.5.

Murskaustapansa lisäksi primääri-, sekundääri- ja tertiääriprosessointilaitteet voidaan jakaa prosessiolosuhteidensa mukaan. Prosessiolosuhteisiin perustuen erilaiset murskauslaitteet voidaan jakaa 1) ambienttiseen, 2) märkä-ambienttiseen ja 3) kryogeeniseen menetelmään. Ambienttiseen menetelmään perustuvissa laitteissa materiaali syötetään jauhatussyksikköön ambienttisessä eli huoneen lämpötilassa (Scrap Tyre News 2015). Märkä-ambienttinen menetelmä on toimintaolosuhteiltaan kuten ambienttinen menetelmä, mutta prosessoinnissa on mukana vettä (Sienkiewicz et al. 2012, 1747). Kryogeenisellä menetelmällä tarkoitetaan kylmäjauhatusta, jossa materiaali syötetään jauhatussyksikköön jäähdytettynä (Scrap Tyre News 2015). Tässä työssä esitetyistä murskaimista kaikki primääri- ja sekundääriprosessointilaitteet kuuluvat ambienttiseen menetelmään. Tertiääriprosessointilaitteista löytyy sekä ambienttiseen, märkä-ambienttiseen että kryogeeniseen menetelmään perustuvia laitteita.

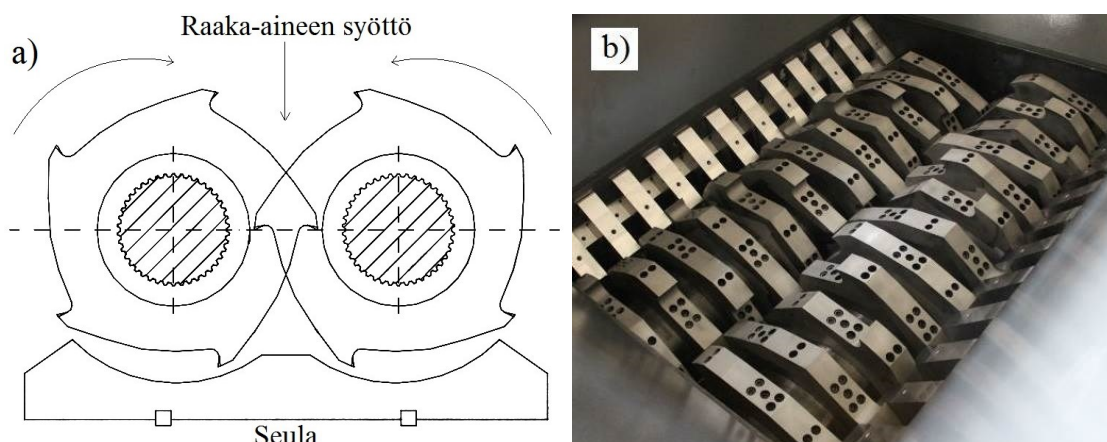
Kierrätysrenkaiden hienontamisprosessin tehostamiseksi erilaisten murskainten yhteyteen voidaan sijoittaa niin sanottuja tukilaitteita, kuten kuljettimia, seuloja sekä metal-

lin- ja tekstiilinerottajia. Murskaimen yhteyteen sijoitettua seulaa voidaan pitää yhtenä tärkeimpänä tukilaitteena, sillä sen läpäisevyysominaisuudet ovat suoraan verrannollisia tuotetun kumipartikkelin palakokoon. Tällaiset seulat ovat usein vaihdettavia. Myös metallin- ja tekstiilinerottajat ovat hyvin tärkeitä, sillä ilman niitä tuotettu kumifraktio sisältäisi yhä paljon epäpuhtauksia. (De et al. 2005, 34–48.) Sekundääriprosessoinnin yhteyteen sijoitettavien metallinerottajien avulla ainakin yli 85 % kaikesta renkaan sisältämästä metallista on mahdollista saada eroteltua kumigranulaatista (Eldan Recycling_a 2014; Unlimited Resources Corporation 2012). Tertiääriprosessoinnin jälkeen puolestaan yli 99 % kaikesta renkaan sisältämästä metallista ja tekstiilistä voidaan erottaa kumijauheesta (Scrap Tyre News 2015).

2.3 Primääriprosessointilaitteet

2.3.1 Leikkaava murskain

Leikkaava murskain (engl. rotary shear shredder) koostuu yhdestä tai useammasta rinnakkain asennetusta roottorista, jonka ympärillä on teriä (Kuva 8). Terät ovat suunniteltu yksittäiseen roottoriin niin, että ne muodostavat vieressä olevan roottorin terien kanssa vastinpareja. Yksiroottorisen leikkaavan murskaimen tapauksessa roottorin terien vastinpareina toimivat laitteistoon asetetut kiinteät vastaterät. Murskaimen ollessa toiminnassa roottorit pyörivät hitaasti (noin 20–40 rpm) vastakkaisiin suuntiin, jolloin niiden väliin syötetty rengasmateriaali leikkautuu siisteihin palasiin. Terien tylsistymisen seurauksena murskaimen leikkaava vaikutus muuntuu vähitellen enemmän repiväksi. Tämän vuoksi leikkaavien murskainten voidaan sanoa perustuvan usein leikkaavan ja repivän menetelmän yhdistelmään. (De et al. 2005, 57–58; Manuel & Dierkes 1997, 13.)

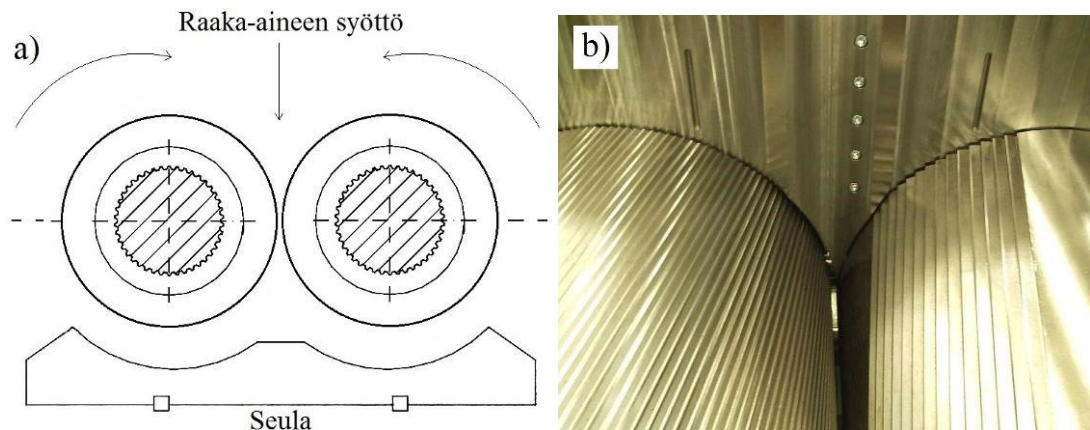


Kuva 8. a) Havainnekuva (Muokattu lähteestä SID 2008, 2) ja b) todellinen kuva (Recycling Product News 2014) kaksiroottorisesta leikkaavasta murskaimesta.

Leikkaavalla murskaimella tuotetun rengasmurskeen palakokoa säädetään pääasiassa rinnakkaisten roottorien sekä niissä olevien terien välistä etäisyyttä muuttamalla (SID, 2). Leikkaava murskain on toimintaominaisuuksiltaan turvallinen, luotettava ja kestävä. Verrattuna suuren pyörimisnopeuden omaaviin primääriprosessointilaitteisiin sen käyttökustannukset ovat myös alhaisemmat, sekä melun, värinän ja pölyn synty on vähäisempää. (De et al. 2005, 58; Armillas 2001.)

2.3.2 Primäärinen valssimurskain

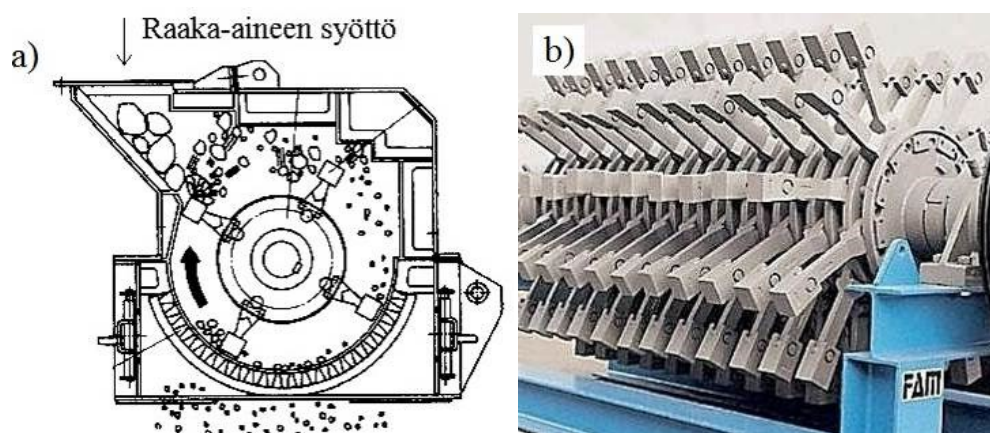
Valssimurskain (engl. cracker mill) muodostuu kahdesta rinnakkain asetetusta valssista, joista molempien tai vain toisen pinnalla on uurteita (Kuva 9). Valssit pyörivät hitaasti (noin 30–50 rpm) eri nopeuksilla akselinsa ympäri vastakkaisiin suuntiin, jonka seurauksena valssien väliin syötetty rengasmateriaali jää puristuksiin ja altistuu uurteiden aiheuttamille repimisvoimille. (De et al. 2005, 55–56; Scrap Tyre News 2015.) Valssien välissä olevan aukon suuruudella kontrolloidaan pääasiassa tuotetun kumipartikkelin kokoa, mutta partikkelikokoon vaikuttaa myös valssissa olevien uurteiden muoto ja valssien välinen kitka. (Manuel & Dierkes 1997, 13–14.) Valssimurskaimesta saatu rengasmurske on tyypillisesti muodoltaan pitkää ja kapeaa mursketta, jolla on suuri ominaispinta-ala. (De et al. 2005, 55–56; Scrap Tyre News 2015.)



Kuva 9. a) Havainnekuva valssimurskaimen rakenteesta ja toiminnasta, sekä b) todellinen kuva valssien pintakuvioista (Buzuluk a.s.).

2.3.3 Vasaramurskain

Vasaramurskain (engl. hammer mill) koostuu kammioista, jonka sisällä on suorakaiteen muotoisilla vasaroilla varustettu nopeasti (noin 3000–4000 rpm) pyörivä roottori (Kuva 10). Rengasmateriaali syötetään kammioon, jossa se murskaantuu toistuvien vasaran iskujen sekä kammion seinämiin ja toisiin kumipartikkeleihin törmäämisen vaikutuksesta. (De et al. 2005, 56–57, 131; Schutte-Buffalo Hammermill; Manuel & Dierkes 1997, 12.) Vasaramurskaimen pyörimisnopeutta sekä vasaroiden määrää ja rakennetta muuttamalla on mahdollista säädellä saadun tuotteen partikkelikokoa (Schutte-Buffalo Hammermill).



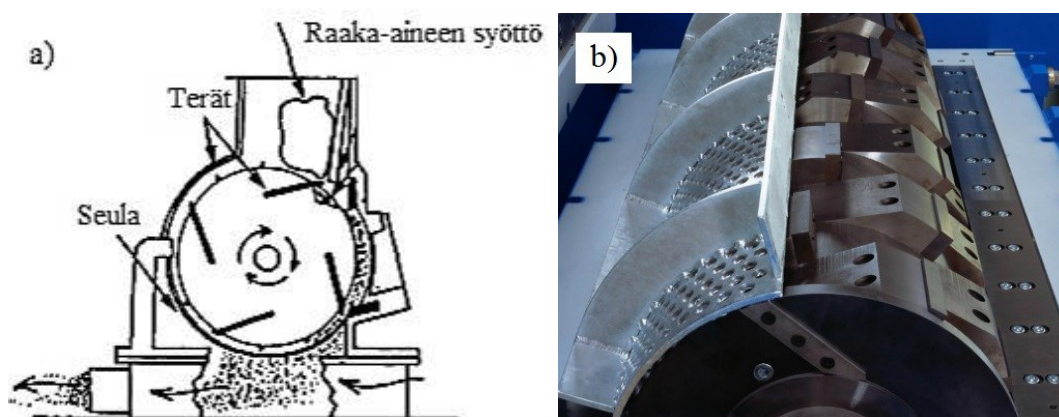
Kuva 10. a) Havainnekuva vasaramurskaimen rakenteesta ja toiminnasta (Muokattu lähteestä Liming Heavy Industry), sekä b) todellinen kuva erään vasaramurskaimen roottorista (DirectIndustry).

Osa vasaramurskaimista perustuu iskuvoiman lisäksi repimisvoimiin, jolloin murskauksen tehokkuuteen vaikuttaa myös roottorin ja kammion ulkoseinän välinen etäisyys (Manuel & Dierkes 1997, 12). Vasaramurskaimet sopivat erityisesti laajojen rengaskasojen nopeaan käsittelyyn, sillä niillä on suuri kapasiteetti. Kyseisten laitteiden heikkoutena on tavallisesti huomattava energiantarve. (De et al. 2005, 56.) Niitä ei pidetä myöskään yhtä turvallisina ja toimintavarmoina kuin esimerkiksi leikkaavia murskaimia (Armillas 2001).

2.4 Sekundääriprosessointilaitteet

2.4.1 Granulaattori

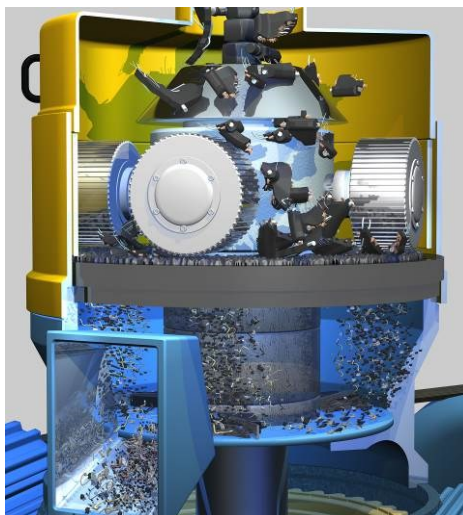
Granulaattori (engl. granulator) (Kuva 11) koostuu kammiosta, jonka sisällä on vaakatasoon asennettu nopeasti (noin 1000–1200 rpm) pyörivä roottori. Sekä roottorin pinnalla että kammion sisäseinämällä on teriä, jotka toimivat toisilleen vastinpareina. Kun roottorin ja kammion seinämien välinen tila pidetään pienenä, prosessiin syötetty raaka-aine leikkautuu pyörivien ja kiinteiden terien välissä. (De et al. 2005, 62.) Granulaattorit ovat laiteominaisuuksiltaan kestäviä ja toimintavarmoja (Granutech-Saturn Systems). Niiden heikkoutena on terien nopea kuluminen, jonka seurauksena laitteiston toiminnan tehokkuus laskee merkittävästi jo lyhyessä ajassa ja kasvattaa huoltokustannuksia (Amandus Kahl GmbH & Co. KG_a; Universe projects international W.L.L.). Granulaattorista saatu tuote on suorakaiteen muotoista ja sillä on jokseenkin rajoittunut ominaispinta-ala. Tuotetun kumigranulaatin kokojakauma on kapea. (De et al. 2005, 73.)



Kuva 11. a) Havainnekuva (Muokattu lähteestä De et al. 2005, 63) ja b) todellinen kuva (FERCELL) tyypillisestä granulaattorista.

2.4.2 Kollarimurskain

Kollarimurskain (engl. pan grinder) on saksalaisen Amandus Kahl GmbH & Co. KG:n kehittämä laite, jossa rengasmurske jauhetaan kumigranulaatiksi kammiossa kollarirullien ja ympyrän muotoisen reikälevyn välissä (Kuva 12). Kollarimurskaimen suomenkielinen nimi tulee suoraan saksalaisesta sanasta ”kollermühle”, jossa ”koller” eli kollari tarkoittaa laitteessa käytettyä sylinterinmuotoista metallirullaa.



Kuva 12. Kollarimurskaimen rakenne ja toimintaperiaate (Amandus Kahl GmbH & Co. KG_b 2014, 2).

Murskaimessa tapahtuvaan materiaalin hienontumiseen vaikuttavat i) repimisvoimat, jotka syntyvät kollarirullien pyöriessä reikälevyn päällä, sekä ii) paine, joka syntyy reikälevyn ja kollarirullien välisen raon automaattisen säädön avulla. Koska kollarimurskaimessa rengasmateriaali hienonnetaan leikkaavien voimien sijaan repimisvoimilla, laitteiston kuluminen ei ole yhtä voimakasta kuin granulaattorissa. Tämän seurauksena tuotetun kumigranulaatin ominaisuudet tai laitteen tuotantokapasiteetti eivät muutu merkittävästi ajan kuluessa ja murskaimella on mahdollista saavuttaa pidempi käyttöikä ja pienempi huoltotarve. Laitteen huollon on kerrottu olevan muihin murskaimiin verrattuna nopeampaa, mikä johtaa prosessin alasajoaikojen minimointiin ja täten alentaa entisestään käyttökustannuksia. Kollarimurskaimesta saadulla kumigranulaatilla on suuri ominaispinta-ala. (Amandus Kahl GmbH & Co. KG_a; Universe projects international W.L.L.)

2.4.3 Sekundäärinen valssimurskain

Sekundääriprosessoinnissa käytetty valssimurskain on toimintaperiaatteeltaan kuten primääriprosessoinnissa käytetty valssimurskain. Myös tuotettu materiaali on muodoltaan samanlaista: pitkää ja kapeaa suuren ominaispinta-alan omaavaa partikkelia. Ero näiden kahden valssimurskaimen välillä on ainoastaan valssien välisessä etäisyydessä ja rakenteessa, jolloin tuotteen palakokokin eroaa. (Scrap Tyre News 2015.) Toimintaominaisuuksiltaan valssimurskain on suhteellisen yksinkertainen. Muihin sekundääriprosessointilaitteisiin nähden sen kapasiteetti on usein pienempi ja energiankulutus suurempi. (De et al. 2005, 61, 63; Eldan Recycling_b 2014, 2; Eldan Recycling_c 2014, 2.)

2.5 Tertiääriprosessointilaitteet

2.5.1 Tertiäärinen valssimurskain

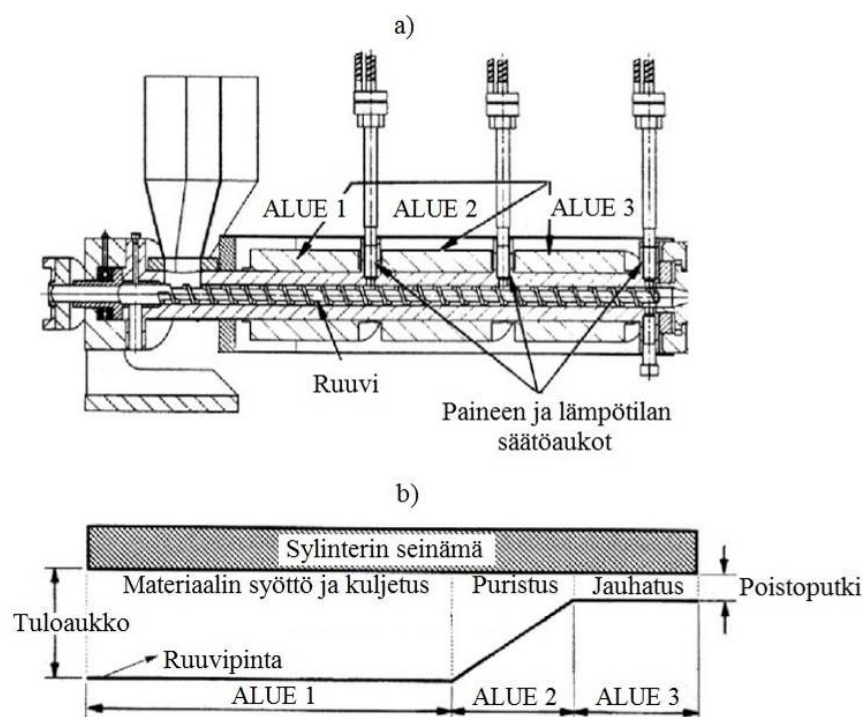
Tertiääriprosessoinnissa käytetty valssimurskain on toimintansa puolesta yhtenevä primääri- ja sekundääriprosessoinnissa käytetyn valssimurskaimen kanssa, mutta rakenteeltaan se on pienempi ja valssit ovat lähempänä toisiaan (De et al. 2005, 60; Scrap Tyre News 2015). Tertiäärin valssimurskaimen heikkoutena pidetään yleisesti siinä käytetyn menetelmän vaikutusta kumin molekyyliarakenteeseen: kitkasta syntyvä lämpö saa aikaan kumipartikkelin termistä hajoamista ja aerobiset prosessiolosuhteet kumipartikkelin pinnan hapettumista. Hapettumisen seurauksena voi tapahtua myös partikkelien uudelleen agglomeroitumista. (Erman et al. 2005, 704–705; Manuel & Dierkes 1997, 12.) Kumin molekyyliarakenteen muutokset eivät ole toivottavia, sillä ne heikentävät kumin mekaanisia ominaisuuksia (Saiwari 2013, 18). Jos jäähdytyksestä ei ole huolehdittu, liiallisen lämpenemisen seurauksena myös jo varastoitu kumi voi syttyä ja olla syynä varastopalolle (Erman et al. 2013, 705). Valssimurskaimella tuotetun kumijauheen ominaisuuksia on koottu Taulukkoon 4.

Taulukko 4. Valssimurskaimella tuotetun kumijauheen keskimääräinen partikkelikoko ja ominaisuudet (CalRecovery, Inc. 2004, 15; De et al. 2005, 73; Erman et al. 2013, 704; Hu et al. 2014, 1973–1974; Lo Presti 2013, 866–867; Scrap Tyre News 2015).

Laite	Tyypillinen partikkelikoko [µm]	Jauheen ominaisuudet
Valssimurskain	500–1000	<ul style="list-style-type: none"> - Karhea pinta - Suuri ominaispinta-ala - Epäsäännöllinen muoto - Kumin molekyyliarakenteessa on voinut tapahtua muutoksia - Metallipitoisuus noin 0,1 % - Tekstiilipitoisuus noin 0,5 %

2.5.2 Ekstruuderi

Ekstruuderi (engl. extruder) koostuu ruuvista ja sitä ympäröivästä sylinterin muotoisesta kammiosta (Kuva 13). Raaka-aine syötetään sylinterin alussa olevaan syöttökuiluun, josta ruuvi kuljettaa materiaalia eteenpäin puristaen sitä pienempään tilavuuteen ja jauhaen samalla hienompaan partikkelikokoon. (De et al. 2005, 66; Manuel & Dierkes 1997, 14.) Ekstruuderilla tuotetuilla kumipartikkeleilla on pitkälti samat ominaisuudet kuin valssimurskaimella tuotetuilla kumipartikkeleilla (Taulukko 5). Lisäksi hienontamisprosessin heikkoudet vastaavat ekstruuderissa ja valssimurskaimessa toisiaan, sillä myös ekstruuderissa tapahtuu lämmön ja hapen aikaansaamaa kumin osittaista hajoamista. Tehokkaalla jäähdytysjärjestelmällä voidaan estää kumijauheen vaurioituminen. (De et al. 2005, 130; Manuel & Dierkes 1997, 12; Mark et al. 2005, 669.)



Kuva 13. Kaaviokuva a) yksiruuvisesta ekstruuderista ja b) ekstruuderikammiosta (Muokattu lähteestä Erman et al. 2013, 706).

Taulukko 5. Ekstruuderilla tuotetun kumijauheen keskimääräinen partikkelikoko ja ominaisuudet (CalRecovery, Inc. 2004, 15; De et al. 2005, 73, 130, 217; Erman et al. 2013, 705; Hu et al. 2014, 1973–1974; Lo Presti 2013, 866–867).

Laite	Tyypillinen partikkelikoko [µm]	Jauheen ominaisuudet
Ekstruuder	200–1000	<ul style="list-style-type: none"> - Karhea pinta - Suuri ominaispinta-ala - Epäsäännöllinen muoto - Kumin molekyylirakenteessa on voinut tapahtua muutoksia - Metallipitoisuus noin 0,1 % - Tekstiilipitoisuus noin 0,5 %

2.5.3 Vesisuihkumurskain

Vesisuihkumurskaimessa (engl. water jet grinder) kumigranulaatit hienonnetaan kammioon johdettavan korkeapaineistetun ja suuren kineettisen energian omaavan vesisuihkun avulla. Kumigranulaattien jauhautumiseen kammiossa vaikuttavat useat tekijät, kuten kavitaatio sekä vesisuihkun iskuvoima ja dynaaminen paine. Verrattuna perinte-

siin mekaanisiin jauhatuslaitteisiin, vesisuihkumurskaimen etuna on, että sen yhteydessä ei synny juurikaan lämpöä, jolloin ei tapahdu kumin hajoamista. (Hu et al. 2014, 1973–1974.)

Vesisuihkumurskaimessa materiaali jauhautuu osittain selektiivisesti, sillä ainoastaan kumi hienontuu pienempään fraktiokokoon samalla kun metallilangat pysyvät koskemattomina johtuen niiden kovuudesta. Valikoivan luonteensa vuoksi renkaan sisältämät vahvikemateriaalit on helppo erotella ja näin vesisuihkumurskaimesta saatu kumijauhe on hyvin puhdasta. (Hu et al. 2014, 1974; Sienkiewicz et al. 2012, 1748.) Menetelmän heikkoutena voidaan pitää jauheen vaatimaa jälkikäsittelyä, jossa kumi kuivataan (De et al. 2005, 131).

Taulukkoon 6 on koottu vesisuihkumurskaimella tuotetun kumijauheen ominaisuuksia. Taulukko 6 on sisällöltään hieman suppeampi kuin edellä esitetyt tertiäärinen valssimurskaimen ja ekstruuderin vastaavat taulukot, koska vesisuihkumurskain edustaa niihin nähden uudempaa tekniikkaa ja näin samoja tietoja ei ollut luotettavasti saatavana.

Taulukko 6. Vesisuihkumurskaimella tuotetun kumijauheen keskimääräinen partikkelikoko ja ominaisuudet (Hu et al. 2014, 1973–1974; Lo Presti 2013, 866; Sienkiewicz et al. 2012, 1748).

Laite	Tyypillinen partikkelikoko [µm]	Jauheen ominaisuudet
Vesisuihkumurskain	100–800	<ul style="list-style-type: none"> - Karhea pinta - Suuri ominaispinta-ala - Kumin molekyyilirakenne muuttumaton

Vesisuihkumurskaintekniikkaa apuna käyttäen voidaan käsitellä myös kokonaisia renkaita ja hienontaa ne heti yhdessä prosessivaiheessa alle 1 mm kokoiseksi kumijauheeksi. Tällöin primääri- ja sekundäärimurskausta ei tarvita. Unkarilaisen yrityksen (HungaroJet Ltd) kehittämässä vesisuihkumurskaimessa kokonaisten renkaiden hienontaminen kumijauheeksi tapahtuu portaitaisesti: vesisuihkun avulla käsitellään renkaan 1) kuluuspinta, 2) sivupinnat ja 3) sisäkerroskumi. Näin renkaan eri osissa käytetyt kumilaadut on mahdollista saada eroteltua toisistaan. Renkaan metallirunko säilyy koskemattomana koko prosessin ajan ja voidaan täten kierrättää sellaisenaan. (Hungarojet Ltd.)

2.5.4 Märkämurskain

Märkämurskaimessa (engl. wet grinder) itse murskauslaite on toimintaperiaatteeltaan kuten valssimurskain. Erona on vain se, että märkämurskaimessa materiaali syötetään jauhatuslaitteistoon kumigranulaattien ja veden muodostamana lietteenä. (Asphalt Rubber Technology Service 2002; Lo Presti 2013, 866; Scrap Tyre News 2015.) Kumigranulaatit sekoitetaan veteen, jotta jauhatuksessa syntyvä kumipöly saataisiin talteen, materiaalin liikuttaminen systeemin sisällä olisi helppoa ja kumipartikkelien ylikuumeneminen sekä sitä kautta terminen hajoaminen saataisiin ehkäistyä (Asphalt Rubber Technology Service 2002).

Kirjallisuuden mukaan märkämurskaimella saadaan tuotettua hyvin puhdasta ja tasalaatua kumijauhetta, joka käytännössä pestään prosessin aikana (Scrap Tyre News 2015). Menetelmän haittapuolena on jauheen vaatima jälkikäsittely, jossa kumin kosteuspitoisuus pienennetään kuivalle ambienttiselle kumijauheelle tyypilliseen arvoon eli alle 1 prosentin kosteuspitoisuuteen (Manuel & Dierkes 1997, 13). Taulukkoon 7 on koottu märkämurskaimella tuotetun kumijauheen ominaisuuksia siltä osin kuin ne olivat luotettavasti saatavana.

Taulukko 7. Märkämurskaimella tuotetun kumijauheen keskimääräinen partikkelikoko ja ominaisuudet (Asphalt Rubber Technology Service 2002; CalRecovery, Inc. 2004, 15; De et al. 2005, 69, 217; Scrap Tyre News 2015).

Laite	Tyypillinen partikkelikoko [μm]	Jauheen ominaisuudet
Märkämurskain	75–300	<ul style="list-style-type: none"> - Karhea pinta - Suuri ominaispinta-ala - Kumin molekyyli rakenne muuttumaton

2.5.5 Kryomurskain

Kryomurskaimen tekniikka perustuu kumigranulaattien esihaurastuttamiseen ja tämän jälkeiseen murskaukseen. Kumin muuttaminen hauraaseen olomuotoon tapahtuu kastelamalla kumin pinta jäähdytinaineella, jolloin kumi jäähtyy lasittumislämpötilaansa noin -80 ja -120 °C:n välille. (De et al. 2005, 66; Shulman 2004, 12–13.) Jäähdytinaineena

käytetään useimmiten noin -230 °C:ssa olevaa nestemäistä typpeä (De et al. 2005, 66), mutta jäähdytinaineeksi soveltuu myös mikä tahansa muu kryogeeninen neste (Erman et al. 2013, 704). Kun kumigranulaatit ovat jäähtyneet, ne murskataan iskuvoimaan perustuvassa murskausyksikössä, kuten vasaramurskaimessa (Scrap Tyre News 2015). Mitä alhaisemmassa lämpötilassa kumigranulaatit syötetään murskausyksikköön, sitä pienempää kumipartikkelia on mahdollista tuottaa (Manuel & Dierkes 1997, 12). Tuotettujen kumipartikkelien ominaisuuksia on esitetty Taulukossa 8.

Taulukko 8. Kryomurskaimella tuotetun kumijauheen keskimääräinen partikkelikoko ja ominaisuudet (CalRecovery, Inc. 2004, 15; De et al. 2005, 73, 217; Erman et al. 2013, 704; Lo Presti 2013, 867; Scrap Tyre News 2015).

Laite	Tyypillinen partikkelikoko [µm]	Jauheen ominaisuudet
Kryomurskain	100–600	<ul style="list-style-type: none"> - Sileä pinta - Rajoittunut ominaispinta-ala - Epäsäännöllinen muoto - Kumin molekyyli rakenne muuttumaton - Metallipitoisuus noin 0 % - Tekstiilipitoisuus noin 0 %

Kryomurskaimen tärkeimpänä teknisenä etuna muihin tertiäriprosessointilaitteisiin nähden voidaan pitää hyvin hienojakoisen jauheen valmistamista ilman kumin rakenteeseen kohdistuvia lämmön tai ilman hapen aikaansaamia muutoksia. Lämmöstä johtuva kumin termien hajoaminen estetään typen jäähdyttävällä vaikutuksella. Aerobisista olosuhteista johtuva kumin pinnan hapettuminen puolestaan estetään prosessissa tapahtuvalla typen haihtumisella, jolloin tyyppi syrjäyttää ilman hapen ja luo näin inertit olosuhteet jauhatussyksikköön. Koska kumigranulaatin jäähdyttäminen alle lasittumislämpötilan johtaa kumin haurastuttamiseen sekä heikentää kumin ja teräksen välisiä sidoksia, metalli ja tekstiili on mahdollista erottaa hyvin tarkasti kumijauheesta. Näin loppu tuotteina saadaan sekä markkinakelpoista puhdasta kumijauhetta että muita puhtaita sivutuotteita. (Manuel & Dierkes 1997, 12–13.)

Kryomurskaimen kohdalla kysymyksiä herättää usein menetelmän kannattavuus, sillä nestemäisen typen käyttö aiheuttaa huomattavia tuotantokustannuksia (Manuel & Dierkes 1997, 13; Sienkiewicz et al. 2012, 1747). Typeä kuluu prosessissa noin 1,1 tonnia jokaista kumitonnia kohden. Nestemäisen typen arvo on noin 95 €/t. (Desitech Group 2015.) Merkittävän jäähdytysnestetarpeen ja sen aiheuttamien lisäkustannusten vuoksi on sanottu, ettei kryogeeninen prosessi olisi kannattava halvoille kumilaaduille, kuten rengaskumille. Kalliimmille kumilaaduille, kuten fluorikumille, se sen sijaan voisi olla kannattava. (Erman et al. 2013, 704.)

Asiasta löytyy kuitenkin eriäviä mielipiteitä, sillä esimerkiksi De et al. (2005, 216–217) mukaan hyvin hienojakoisen kumijauheen tuottaminen olisi kannattavampaa kryomurskaimella kuin ambienttisella murskaimella. Syy tähän on yksinkertainen: hauraassa muodossa oleva kumi on helpompi jauhaa, jolloin laitteiston kulumista tapahtuu vähemmän ja näin huoltokustannukset alenevat huomattavasti. Lisäksi sähkönkulutus kryomurskaimessa on pienempää kuin ambienttisissa murskaimissa. (De et al. 2005, 216–217.) On huomattava, että kryomurskaimen kohdalla energiaa kuluu myös tuotettujen kumipartikkelien loppukäsittelyyn: lämmitykseen ja kuivaukseen. Sienkiewicz et al. (2012, 1747) mukaan kumin kosteuspitoisuus kryomurskaimen jälkeen on 12–15 % sen massasta, mikä on huomattavasti suurempi kuin ambienttisessa murskauksessa saadun kumijauheen kosteuspitoisuus (noin 1 %).

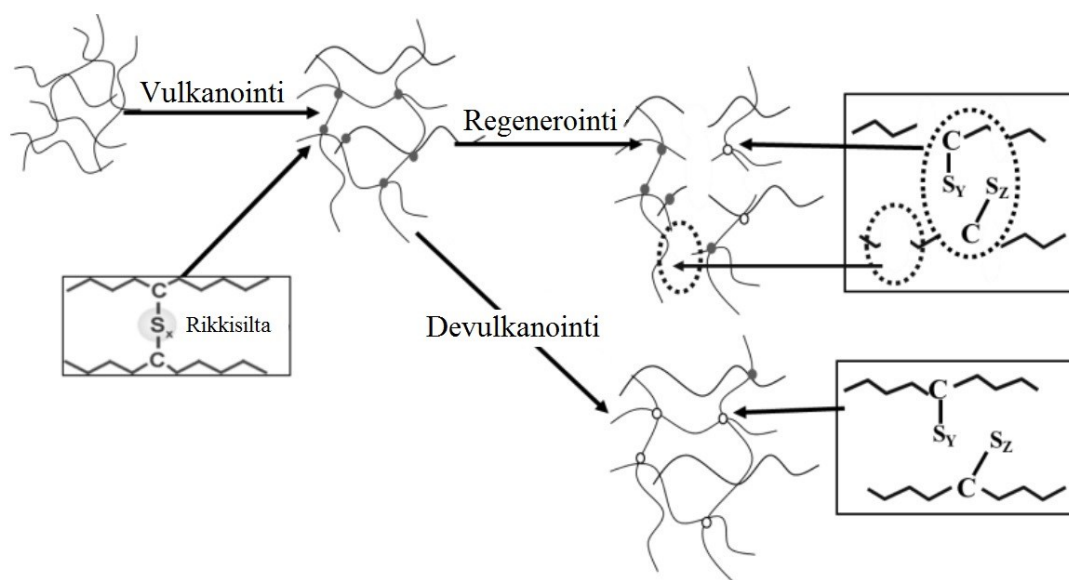
2.6 Kumipartikkelien devulkanointi

2.6.1 Devulkanointiprosessit

Teoreettisesti tarkasteltuna devulkanointi on vulkanoinnin käänteinen prosessi, jossa vulkanoinnissa syntyneet, pitkiä polymeeriketjuja yhdistävät, hiili-rikki (C–S) ja rikki-rikki (S–S) -sidokset puretaan. Koska prosessi ei vaikuta kumiin muilla tavoin, kyseisten mono-, di- ja polyrikkisten ristisidosten täydellisessä purkautumisessa kumiseos palautuu alkuperäiseen muotoonsa ja saa näin takaisin alkuperäiset ominaisuutensa. Devulkanoitu kumi on ihanteellinen materiaali kierrätystä ajatellen, sillä se voidaan käyttää neitseellisen kumin korvaajana uuden kumituotteen valmistuksessa ilman laatu- ja ympäristömuutoksia. (De et al. 2005, 403; Saiwari 2013, 2–3, 18.)

Käytännössä täydellistä devulkanointiprosessia ei ole pystytty maailmalla vielä toteuttamaan. Tämä tarkoittaa, että kaikkia kumin vulkanoinnissa syntyneitä rikkisidoksia ei ole pystytty purkamaan ilman samanaikaisesti tapahtuvia pääpolymeeriketjujen rakennemuutoksia. Pääpolymeeriketjujen rakennemuutokset, kuten hiili-hiili (C-C) -sidosten hajoamiset, eivät ole toivottavia, sillä niiden seurauksena kumi ei palaudu haluttuun alkuperäiseen muotoonsa vaan saa uuden rakenteen. Hajoamisen seurauksena kumin laatu heikkenee muun muassa mekaanisten ominaisuuksien osalta. Tämä johtaa tilanteeseen, jossa devulkanoitua kumia ei voida täysin pitää neitseellisen kumin korvaajana. (De et al. 2005, 403; Saiwari 2013, 2–3, 18.)

Prosessista, jossa tapahtuu samanaikaista rikki- ja hiilisisidosten purkautumista, käytetään nimitystä regenerointi. Näin ollen nykyisin käytetyistä devulkanointimenetelmistä pitäisikin tarkalleen ottaen käyttää nimeä regenerointimenetelmät. Tässä työssä termejä regenerointi ja devulkanointi on käytetty toistensa synonyymeinä, vaikka ne todellisuudessa eroavat toisistaan. (Saiwari 2013, 2–3, 18.) Kuvassa 14 esitetään täydellisen devulkanoinnin ja regeneroinnin ero.



Kuva 14. Devulkanoinnin ja regeneroinnin ero (Muokattu lähteestä Saiwari 2013, 2).

Devulkanointi ei ole prosessina uusi, sillä käytännössä sitä on tutkittu jo vuodesta 1844 alkaen. Noin 170 vuotta kestäneen tutkimustyön aikana on ehditty kehittää, käyttää ja kaupallistaa monia devulkanointiprosesseja. (De et al. 2005, 402.) Tästä huolimatta CalRecovery, Inc (2004, 1) mukaan vuonna 2004 vain hyvin pieni määrä devulkanoin-

tiprosesseista oli käytössä. Taulukkoon 9 on koottu kirjallisuudessa yleisesti esitetyt devulkanointimenetelmät fysikaalisiin, kemiallisiin ja biologisiin prosesseihin jaoteltuna.

Taulukko 9. Devulkanointimenetelmät niiden toimintaperiaatteen mukaan jaoteltuna (Saiwari 2013, 19; De et al. 2005, 406–412; CalRecovery, Inc. 2004, 1, 15–21).

Fysikaaliset prosessit	Kemialliset prosessit	Biologiset prosessit
- Mekaaninen - Termomekaaninen - Mikroaaltoihin perustuva - Ultraääniaaltoihin perustuva	- Mekaaniskemiallinen - Termokemiallinen - Kemiallinen	- Bioteknologinen

Fysikaalisissa prosesseissa rikkisidosten purkaminen tapahtuu yksinkertaisesti mekaanisen ja/tai termisen energian avulla. Fysikaalisten menetelmien ongelmana on se, että energiaa ei pystytä niissä kohdistamaan ainoastaan rikkisidoksiin, jolloin samanaikainen pääpolymeeriketjujen hajoaminen on yleistä. Teoriassa juuri oikeaa energiamäärää käyttämällä rikkisidosten selektiivinen purkaminen pitäisi olla mahdollista, sillä hiili-rikki- ja rikki-rikki-sidosten välinen sidosenergia on pienempi kuin hiili-hiili-sidosten. Käytännössä tämä ei kuitenkaan toimi materiaalissa vallitsevan termisen epähomogeenisuuden sekä rikki- ja hiilisidosten välillä olevan suhteellisen pienen sidosenergiaeron vuoksi. (Saiwari 2013, 19–23.) Osassa fysikaalisista prosesseista materiaalin täydellistä devulkanointia vaikeuttaa myös se, että devulkanointireaktio tapahtuu vain partikkelin pinnalla (CalRecovery, Inc. 2004, 1).

Kemiallisissa prosesseissa rikkisidoksiin pyritään vaikuttamaan erilaisten orgaanisten ja epäorgaanisten kemikaalien avulla joko niin, että kemikaalit

- i. rikkovat rikkisidoksia
- ii. reagoivat rikkisidosten purkautumisen seurauksena syntyvien vapaiden radikaalien kanssa estäen näin rikkisidosten uudelleen yhdistymisen.

Vaihtoehdossa (ii) itse rikkisidosten purkautuminen saadaan aikaan fysikaalisin menetelmin. Pelkistettyihin fysikaalisiin prosesseihin nähden useimmat kemialliset menetel-

mät ovat tehokkaampia ja nopeampia. Lisäksi niiden avulla on mahdollista kohdistaa tapahtuvat molekyyliarakenteen muutokset koskemaan juuri rikkisidoksia. (Saiwari 2013, 23–24.) Kemiallisten prosessien valikoivasta luonteesta huolimatta suurimmassa osassa menetelmiä tapahtuu myös pääpolymeeriketjujen hajoamista. Hajoamista on kahdenlaista: 1) prosessiin tuotu lämpö ja paine synnyttävät termistä hajoamista, sekä 2) prosessin aerobiset olosuhteet hapettavat kumipartikkelin pintaa. (De et al. 2005, 406–412.) Lisäksi kemiallisen prosessin heikkoudeksi voidaan katsoa devulkanointireaktion vaikutusalueen ulottuminen ainoastaan kumipartikkelin pinnalle (CalRecovery, Inc. 2004, 1).

Biologisissa prosesseissa rikkisidokset puretaan rikkiä hyväksikäyttävien mikrobien avulla. Käytettävät mikrobit voivat olla anaerobisia tai aerobisia. Aineenvaihduntansa seurauksena mikrobit purkavat rikkisidoksia ja muuntavat rikin uusiksi aineiksi: anaerobiset mikrobit muuntavat rikin rikkivedyksi, aerobiset sulfaatiksi tai muiksi happea sisältäviksi rikkipohjaisiksi yhdisteiksi. Anaerobisessa prosessissa tuotettu devulkanoitu kumi on laadultaan parempaa, sillä siinä ei tapahdu kumipartikkelin pinnan hapettumista toisin kuin aerobisessa prosessissa tapahtuu. Kummassakin vaihtoehdossa pääpolymeeriketjut pysyvät muuten rikkoutumattomina. (Li et al. 2012, 7; Stevenson et al. 2008, 4–5, 9.) Biologisista prosesseista voidaan erottaa kolme pääasiallista heikkoutta:

- 1) Kumipartikkelien hydrofobisesta eli vettä hylkivästä luonteesta johtuen mikrobit voivat vaikuttaa vain kumipartikkelin pinnalla. Tämän seurauksena prosessi vaatii hyvin pienen fraktiokoon omaavaa rengasjauhetta kaikkien rikkisidosten purkamiseksi. (Christiansson et al. 1998, 637, 639; De et al. 2005, 423–424.)
- 2) Kumin kolmiulotteinen rakenne ei edistä biohajoamista ja siksi biologinen prosessi on hidas (De et al. 2005, 424).
- 3) Käytetyt mikrobit ovat erittäin herkkiä ympäristössä tapahtuviin olosuhteiden muutoksiin (CalRecovery, Inc. 2004, 11) sekä tiettyihin renkaassa oleviin myrkyllisiin aineisiin. Renkaassa olevat mikrobeille haitalliset aineet tulisivat pois-
taa materiaalista ennen devulkanoinnin aloittamista (Stevenson 2008, 1, 3, 9).

Edellä esitettyjen fysikaalisten, kemiallisten ja biologisten devulkanointimenetelmien perusteella devulkanoinnin suurimpana ongelmana on jo aiemminkin mainittu kumissa tapahtuva epäedullinen ja ei-toivottu rakennemuutos (De et al. 2005, 402–403 Saiwari

2013, 3, 15–16). Oman haasteensa devulkanoidun kumin hyödyntämiseen tuo myös rengasvalmistajasta ja renkaan tyypistä riippuva kumin koostumus, mikä johtaa tuotettujen kumipartikkelien jatkuvaan laadulliseen vaihteluun (Waste Management World 2003).

Yllä mainituista epäkohdista johtuen devulkanoidulla kumilla voidaankin korvata neitseellistä kumia vain tietyissä määrin ilman, että uuden tuotteen laadusta, turvallisuudesta ja toiminnasta joudutaan tinkimään. Näin ollen esimerkiksi uusissa renkaissa devulkanoidun kumin käytön ehdottomana ylärajana pidetään yleisesti 5 %. Muissa kumituotteissa, joissa turvallisuus ei ole niin kriittinen (esim. kengänpohjat, matot, auton osat), osuus voi sen sijaan olla huomattavasti korkeampi. (Levgum; Waste Management World 2003.) Käytännössä yli puolet kaikista maailmassa valmistetuista kumituotteista on renkaita, mikä rajoittaa devulkanoidun kumin soveltuvuutta suurimpaan osaan markkinoita. Tästä huolimatta devulkanoitua kumia voidaan pitää arvokkaana raaka-aineena, joka voi korvata neitseellistä kumia monissa muissa tuotteissa. (De et al. 2005, 402–403 Saiwari 2013, 3, 15–16.)

2.6.2 Sekundääriprosessoinnissa saatujen kumipartikkelien devulkanointi

Devulkanointiprosessiin syötettävän kumimateriaalin täytyy vastata tiettyjä laatuvaatimuksia prosessin toiminnan takaamiseksi ja ihanteellisen tuotteen aikaansaamiseksi. Laatuvaatimukset riippuvat jossain määrin käytetystä devulkanointimenetelmästä, mutta yleisenä periaatteena voidaan pitää seuraavien ehtojen täyttymistä (CalRecovery, Inc. 2004, 6–7, 14–15):

- raaka-aineen partikkelikoko alle 2,0 mm
- raaka-aineen (partikkeleilla) suuri ominaispinta-ala
- raaka-aine ei sisällä metallia ja tekstiiliä
- raaka-aineen hajoamista ei ole tapahtunut.

Käytännössä täydellisesti kaikkia edellä esitettyjä vaatimuksia täyttävää renkaiden esikäsittelymenetelmää ei ole olemassa, sillä lähes kaikissa renkaan hienontamismenetelmissä tapahtuu ainakin jonkinasteisia kumin molekyyliarakenteen muutoksia. Hyvin lähellä kyseisiä laatuvaatimuksia on kuitenkin mahdollista päästä useiden menetelmien

avulla. Koska raaka-aineen partikkelikoon ylärajaksi on määritetty 2,0 mm, tertiääriprosessointimenetelmien ohella osa sekundääriprosessointimenetelmillä tuotetuista kumi-partikkeleista näyttäisi soveltuvan kokonsa puolesta käytettäväksi devulkanointiin.

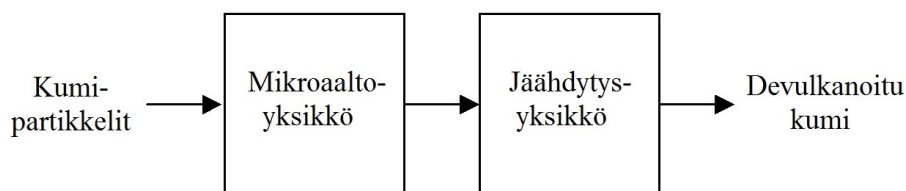
Sekundääriprosessoinnissa saatujen tuotteiden käyttö devulkanoinnin raaka-aineena voisi olla järkevää, sillä renkaiden hienontamiseen käytettyjä prosessivaiheita vähentämällä investointi- ja tuotantokustannukset alenevat (De et al. 2005, 424). Isoimpien partikkelien (tässä: noin 850–2000 μm) käyttö tuottaa kuitenkin tietyn rajoitteen devulkanointiin: käytetyssä devulkanointimenetelmässä itse devulkanointireaktion tulisi läpäistä partikkeli, jotta tuotetun materiaalin devulkanoitumisaste olisi kilpailukykyinen pienemmistä partikkeleista tuotetun materiaalin kanssa. Olemassa olevista devulkanointimenetelmistä ainoastaan mikroaaltoihin ja ultraääniaaltoihin perustuvat devulkanointimenetelmät pystyvät läpäisemään partikkelin, koska niissä hyödynnetään materiaalissa etenevää sähkömagneettista ja mekaanista aaltoliikettä (Taulukko 10).

Taulukko 10. Devulkanointimenetelmät niissä tapahtuvan reaktion vaikutusalueen mukaan jaoteltuna (CalRecovery, Inc. 2004, 1).

Devulkanointireaktio läpäisee partikkelin	Devulkanointireaktio tapahtuu partikkelin pinnalla
<ul style="list-style-type: none"> - Mikroaaltoihin perustuva - Ultraääniaaltoihin perustuva 	<ul style="list-style-type: none"> - Mekaaninen - Termomekaaninen - Mekaaniskemiallinen - Termokemiallinen - Kemiallinen - Bioteknologinen

2.6.3 Mikro- ja ultraääniaaltoihin perustuva devulkanointi

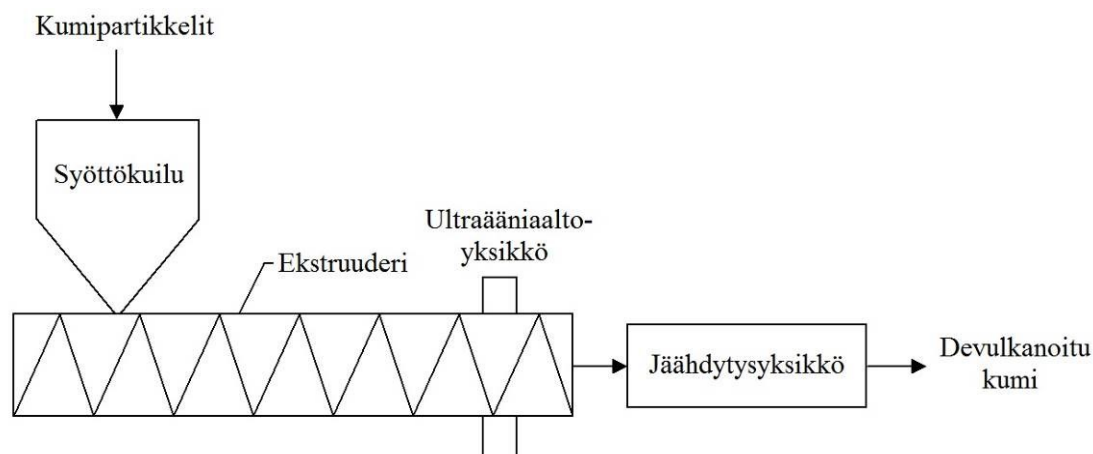
Mikroaaltoihin perustuvassa devulkanoinnissa raaka-aineeseen kohdistetaan sähkömagneettisia mikroaalloja (Kuva 15). Kun mikroaallot kohtaavat devulkanointiprosessiin syötetyn kumimateriaalin, niiden sisältämä säteilyenergia muuttuu molekyylien liikkeen vaikutuksesta lämpöenergiaksi, joka pystyy oikeassa määrin annosteltuna purkamaan kumin rikkisidoksia. Syntyneen lämmön seurauksena mikroaaltoihin perustuva devulkanointiprosessi vaatii jäähdytysyksikön materiaalin jäähdyttämiseksi. (CalRecovery, Inc. 2004, 10, 19, 62; Saiwari 2013, 21.)



Kuva 15. Mikroaaltoihin perustuva devulkanointiyksikkö (Muokattu lähteestä CalRecovery, Inc. 2004, 19).

Mikroaaltoihin perustuvan devulkanoinnin ongelmana on, että käsiteltävän materiaalin täytyy olla ominaisuuksiltaan tarpeeksi poolista, jotta se pystyy riittävällä nopeudella ottamaan vastaan sähkömagneettisen säteilyenergian ja muuttamaan sen devulkanointireaktion tarvitsemaksi lämpöenergiaksi. Ainoa renkaissa käytetty kyllin poolinen kumi on EPDM eli etyleenipropreenidieenikumi (engl. ethylene-propylene-diene-monomer rubber), jonka käyttö renkaissa on kuitenkin hyvin vähäistä. Renkaissa yleisimmin käytetyt kumilaadut (NR, SBR, BR) eivät ole tarpeeksi poolisia tullakseen devulkanoiduiksi mikroaaltoteknologialla, sillä niiden kohdalla riittävää lämpöenergiaa ei pystytä saavuttamaan. (CalRecovery, Inc. 2004, 10, 19, 62; Saiwari 2013, 21.)

Ultraääniaaltoihin perustuva devulkanointi tapahtuu ultraääniyksiköllä varustetussa ekstruuderissa (Kuva 16), jossa kumin rakennemuutokset tapahtuvat kavitaatioilmiön seurauksena. Kavitaatiossa kumiseokseen muodostuu hyvin pieniä kavitaatiokuplia, joiden nopea romahtaminen vapauttaa suuren määrän energiaa. Kavitaatio syntyy ekstruuderissa vallitsevan paineen ja lämpötilan sekä prosessiin syötettyjen korkeatehoisten ultraääniaaltojen yhteisvaikutuksesta. Prosessissa vallitsevan korkean lämpötilan seurauksena ekstruuderia seuraa jäähdytysyksikkö materiaalin lämpötilan tasaamista varten. (De et al. 2005, 377–378; Saiwari 2013, 22–23.)



Kuva 16. Ultraääniaaltoihin perustuvassa devulkanoinnissa käytetään suuritehoisia ultraääniaaltoja yhdessä ekstruuderin kanssa (Muokattu lähteestä CalRecovery, Inc. 2004, 18).

Teoriassa kavitaation seurauksena syntyneellä energialla pitäisi pystyä rikkomaan ainoastaan sidosenegialtaan heikoimmat hiili-rikki ja rikki-rikki-sidokset. Ultraäänialloilla käsitellyn kumin rakennetutkimukset ovat kuitenkin osoittaneet, että myös hiili-hiili-sidoksia rikkoutuu. (De et al. 2005, 377–378; Saiwari 2013, 22–23.) Tosin laajuudeltaan hiili-hiili-sidosten rikkoutumisen on katsottu olevan pienempää ultraääniaaltodevulkanoinnissa kuin muissa devulkanointimenetelmissä (Read 2012, 45).

Ultraääniaaltoihin perustuvan devulkanointimenetelmän etuna on sen nopeus, tehokkuus ja yksinkertaisuus. Lisäksi se ei vaadi mitään kemikaaleja tai liuottimia toimiakseen, jolloin ei tapahdu kumin kontaminoitumista muiden aineiden kanssa. (Saiwari 2013, 22–23.) Tuotettua devulkanoitua kumia on kuvailtu pehmeäksi, joka mahdollistaa sen uudelleen prosessoinnin, muotoilun ja vulkanoinnin neitseellisen kumin kaltaisesti. Tehtyjen tutkimusten valossa ultraäänialloilla devulkanoitu ja tämän jälkeen uudelleen vulkanoitu kumi osoitti hyviä mekaanisia ominaisuuksia. Toisin kuin mikroaaltoihin perustuva devulkanointi, ultraääniaaltodevulkanointi soveltuu useille eri kumilaaduille. (De et al. 2005, 334.)

Ultraääniaaltomenetelmän merkittävänä ongelmana on ollut pitkään sen kehittäminen teollisuuden mittakaavaan sopivaksi. Tehokkuudeltaan riittämättömien ultraäänilaitteiden puuttuessa, ultraääniaaltoihin perustuva devulkanointi ei ole ollut kannattava isossa mittakaavassa. Tekniikan kehittyessä yhä suurempitehoisia ultraäänialtolaitteita on kuitenkin nykyisin saatavana. Tästä huolimatta ultraääniaaltoihin perustuva devul-

kanointi ei ainakaan vielä vuonna 2012 ollut kannattava rengasteollisuudelle, jossa laitteiston pitäisi pystyä prosessoimaan rengaskumia ainakin yli 230 kg/h. (Read 2012, 44–45.)

Vuonna 2012 Yhdysvaltain Akron yliopiston teolliseen tuotantoon rakentaman ultraääniaaltoihin perustuvan devulkanointilaitteiston kapasiteetti oli noin 90–135 kg jauhettua kumia vuorokaudessa. Tämä laite koostui neljästä ultraääninyksiköstä, joka kuvaa hyvin sitä, ettei yhden ultraääniaaltolaitteen teho edelleenkään ole kovin korkea. Kyseinen Akron yliopistossa valmistettu laitteisto on kuitenkin saanut hyvää palautetta eräästä kumialan yrityksestä. Yrityksen mukaan laitteen avulla talon sisällä syntyvää kumijätettä on saatu devulkanoitua uudelleenkäyttöön, jolloin polttoon menevän kumijätteen määrä on vähentynyt ja toiminnan kustannustehokkuus on parantunut. (Read 2012, 44–45.)

Vuonna 2013 Akron yliopistossa tehtiin diplomityö, jonka aiheena oli ultraääniaaltoihin perustuvan devulkanoinnin vaikutukset erikokoisiin rengaskumipartikkeleihin. Työn kokeellisen osuuden yhtenä osana tarkasteltiin kumipartikkelien devulkanoitumisasteen riippuvuutta niiden palakoosta. Tutkimuksissa ilmeni, että kumipartikkelin devulkanoitumisaste on sitä suurempi mitä pienempi partikkeli on kyseessä. (Liang 2013, 48, 71.) Havainto osoitti selkeästi, että huolimatta ultraääniaaltoihin perustuvan devulkanointireaktion partikkelin läpäisevistä ominaisuuksista, partikkelikoolla on vaikutusta kumin devulkanoitumisasteeseen. Näin ollen myös ultraääniaaltomenetelmän avulla on mahdollista saada sitä parempia tuloksia mitä pienempiä kumipartikkeleita prosessiin syötetään.

2.7 Kierrätysrenkaan käsittelyn ympäristövaikutukset ja taloudelliset vaikutukset

2.7.1 Murskaus- ja jauhatusmenetelmien päästöt

Renkaiden hienontamisesta aiheutuvia ympäristöhaittoja voidaan tarkastella niissä syntyvien päästöjen avulla. Päästöt voidaan luokitella ilma-, nestemäisiksi tai kiinteiksi päästöiksi, ja niitä voi muodostua sekä yksittäisen murskaimen varsinaisesta toiminnasta että sen tukitoiminnoista. Varsinaisesta toiminnasta syntyviä päästöjä voidaan kutsua suoriksi päästöiksi, tukitoiminnoista muodostuvia päästöjä välillisiksi päästöiksi. Tuki-

toiminnot pitävät sisällään esimerkiksi laitteiden sähköntuotannon, laitehuollon, varastoinnin sekä kuljetuksen. Tässä luvussa käsitellään murskainten suoria päästöjä lukuun ottamatta kiinteitä päästöjä sekä melu- ja hajuhaittoja. Välillisten päästöjen osalta tarkastellaan ainoastaan energiankulutuksesta syntyviä ilmapäästöjä, sillä niillä katsotaan olevan merkittävin yhteys yksittäisen murskaimen ympäristökuormitukseen.

Rengasmateriaalin hienontamiseen liittyvistä ilmapäästöistä huomattavin on kumipöly (hiukkaspäästö), jota ei kuitenkaan yleisesti teollisessa mittakaavassa pidetä kovin merkittävänä päästönä. Kumipölyä syntyy lähinnä ambienttiseen ja kryogeeniseen menetelmään perustuvissa laitteissa. (ChemRisk LLC 2009, 29, 33, 37.) Märkä-ambienttisissa laitteissa ei synny juurikaan pölyä, sillä prosessissa käytetty neste sitoo hiukkaset estäen näin niiden leviämisen ilmaan (Asphalt Rubber Technology Service 2002; Sienkiewicz et al. 2012, 1748). Ambienttisia ja kryogeenisiä menetelmiä tarkasteltaessa syntyvän pölymäärän voidaan sanoa kasvavan murskausprosessin edetessä niin, että mitä hienompaa partikkelikokoa tuotetaan, sitä enemmän pölyhiukkasia syntyy. Kryogeenisessä prosessissa syntyy vähemmän kumipölyä kuin vastaavassa ambienttisessä prosessissa. (ChemRisk LLC 2009, 29, 33, 37.)

Kumipöly koostuu aineista, joita on käytetty renkaan valmistusprosessissa, ks. Taulukko 3. Rengaskumin sisältämät aineet voidaan luokitella yleisesti reaktiivisiin aineisiin ja ei-reaktiivisiin aineisiin. Reaktiivisilla aineilla tarkoitetaan aineita, jotka muuttuvat toiseksi aineiksi renkaan valmistusprosessin ja renkaan käytön aikana. Tämän vuoksi reaktiivisten aineiden pitoisuus käytöstä poistetuissa renkaissa on pienempi kuin mitä se alun perin niissä oli. Reaktiivisia aineita on esimerkiksi vulkanointiaineissa, aktivaattoreissa ja suoja-aineissa. Näistä vulkanointiaineet ja aktivaattorit reagoivat toisten aineiden kanssa jo renkaan valmistusprosessin aikana, kun taas suoja-aineet reagoivat muiden aineiden kanssa renkaan käytön aikana. Ei-reaktiivisten aineiden pitoisuuksien oletetaan pysyvän renkaassa samana läpi sen koko elinkaaren. Ei-reaktiivisia aineita on esimerkiksi täyteaineissa ja pehmittimissä. (ChemRisk LLC 2009, 29, 33, 37.)

Hiukkaspäästöjä syntyy myös murskaimen energiantuotannon yhteydessä polttoaineen poltossa (Energiateollisuus ry_a). Murskauslaitteesta ja sen energiantuotantotavasta riippuen nämä hiukkaspäästöt ovat suoria tai välillisiä. Jos murskain käyttää polttomootoria, hiukkaspäästöt ovat suoria, sillä murskain tuottaa itse energiansa muuttamalla

kiinteän, nestemäisen tai kaasumaisen polttoaineen mekaaniseksi energiaksi (Motiva 2014). Jos puolestaan murskain on sähkömoottorikäyttöinen, siitä aiheutuvat energiantuotannon hiukkaspäästöt tapahtuvat energialaitoksella ja täten päästöt ovat välillisiä. Hiukkaspäästöjen ohella energiantuotanto aiheuttaa muitakin ilmapäästöjä. Polttomoottorilla toimivat murskaimet päästävät ilmaan polttoaineen palamisen seurauksena esimerkiksi typen oksideja (NO_x), häkää eli hiilimonoksidia (CO), hiilivetyjä (HC) sekä hiilidioksidia (CO_2). (Motiva 2014.) Murskaimelle sähköä tuottava energialaitos puolestaan voi energialähteestään riippuen tuottaa esimerkiksi hiilidioksidia (CO_2), metaania (CH_4), typpioksiduulia (N_2O), rikkidioksidia (SO_2) ja typen oksideja (NO_x) (Energiateollisuus ry_b; Energiateollisuus ry_c).

Mitä enemmän laite kuluttaa energiaa, sitä enemmän ilmapäästöjä syntyy energiantuotannon seurauksena. Erilaisten laitteiden energiankulutusta tarkasteltaessa yleisenä periaatteena voidaan pitää, että energiankulutus kasvaa tuotetun partikkelikoon pienentyessä (Bredberg et al. 2005, 364). Näin ollen tertiäriprosessointi kuluttaa enemmän energiaa kuin primääriprosessointi. Prosessointivaiheesta ja käytetystä laitteesta riippumatta renkaan hienontaminen kuluttaa varsin vähän energiaa, jos vertailuarvoksi otetaan esimerkiksi renkaan valmistukseen käytettävä energia tai kierrätysrenkaan energiahyödyntämisessä tuotettava energiamäärä (Waste Management World 2003). Waste Management Worldin (2003) mukaan halkaisijaltaan noin 1 mm kumipartikkelien jauhamiseen kuluu energiaa noin 1,2 kWh/kg. Uuden renkaan valmistus puolestaan vaatii energiaa noin 32 kWh/kg, kierrätysrenkaan energiahyödyntämisessä tuotetun energiamäärän ollessa noin 9 kWh/kg (32,4 MJ/kg).

Murskainten ilmapäästöjä tarkasteltaessa on hyvä huomioida kryogeenisessä menetelmässä syntyvä typpikaasu N_2 , jota haihtuu jatkuvasti prosessissa. Typpikaasu on väritön, hajuton ja mauton, ja siksi sitä on ihmisaistein vaikea havaita. Typeä käytettäessä sen asianmukaisesta käsittelystä on huolehdittava, sillä sisäilmaan päästessään sen pitoisuuden nousu voi johtaa esimerkiksi hapenpuutteeseen aiheuttaen tukehtumisvaaran, tai ympäristön paineen kasvuun aiheuttaen räjähdysvaaran. Koska haihtunut typpi on edelleen hyvin kylmää, se voi myös olla syynä erilaisiin paleltumiin. Ulkoilmaan päästetty typpi ei aiheuta vaaraa ympäristölle, sillä typpi on inertti kaasu, joka ei reagoi muiden aineiden kanssa normaaleissa olosuhteissa. (Aga 2015; University of Iowa.)

Rengasmateriaalin hienontamiseen liittyviä suoria nestemäisiä päästöjä syntyy märkä-ambienttisissa prosesseissa, kun tuotetut kumipartikkelit erotellaan prosessivedestä. Koska märkä-ambienttisissa prosesseissa käytetty vesi on suorassa kosketuksessa kumipartikkelien kanssa, sen on teoriassa mahdollista sisältää kaikkia renkaan sisältämiä aineita. Useimpien aineiden liukenevuus veteen on heikkoa, joka helpottaa niiden erottelua. Toiset aineet kuitenkin liukenevat ja/tai suspendoituvat veteen paremmin. Prosessiveden suuresta määrästä ja erinäisten lisäaineiden pitoisuudesta johtuen vesi vaatii aina asianmukaisen käsittelyn. (CWC 1996, 1.)

2.7.2 Murskaus- ja jauhatusmenetelmien kustannustehokkuus

Bredberg et al. (2005, 364) mukaan murskaustoiminnan kustannuksista suurin osa syntyy laitteiden energiankulutuksesta, joka täten voidaan ajatella tärkeimmäksi tekijäksi laitteiden kustannustehokkuutta tarkasteltaessa. Yleisesti voidaan sanoa, että energiankulutus kasvaa tuotetun kumipartikkelin pienentyessä, minkä seurauksena esimerkiksi tertiäriprosessointilaitteiden kokonaiskäyttökustannukset ovat suuremmat kuin primääriprosessointilaitteiden. Laitteiden kustannustehokkuutta tarkasteltaessa ei ole kuitenkaan mielekästä tarkastella eri prosessointivaiheisiin kuuluvia laitteita keskenään, koska näistä saatavilla tuotteilla on hyvin erilaiset ominaisuudet ja markkinahinnat (Waste Management World 2003), mikä hankaloittaa prosessien taloudellisen kannattavuuden vertailua. Sen sijaan samaan prosessointivaiheeseen kuuluvia laitteita voidaan verrata keskenään, koska näillä laitteilla saatujen tuotteiden voidaan olettaa vastaavan riittävällä tarkkuudella toisiaan.

Primääri- ja sekundääriprosessointilaitteista leikkaavaan menetelmään perustuvat laitteet (leikkaava murskain primääriprosessoinnissa ja granulaattori sekundääriprosessoinnissa) ovat kirjallisuuden mukaan usein kustannustehokkaimpia murskaimia, sillä niissä energiankulutus on pienempää kuin korkeaan iskuvoimaan perustuvassa vasaramurskaimessa ja repivään menetelmään perustuvassa valssimurskaimessa. (De et al. 2005, 56–63; Eldan Recycling_b 2014, 2; Eldan Recycling_c 2014, 2.) Sekundääriprosessointilaitteita tarkasteltaessa toki myös kollarimurskaimen sanotaan olevan taloudellisesti kannattava energiankulutuksensa ja alhaisten huoltokustannustensa vuoksi (Amandus Kahl GmbH & Co. KG_b, 4).

Tertiääriprosessointilaitteita vertailtaessa ambienttiseen menetelmään perustuvia laitteita pidetään yleisesti kustannustehokkaimpina (Lo Presti 2013, 866): niillä on mahdollista tuottaa kumijauheeksi kelpaavaa materiaalia pienimmin kokonaiskustannuksin. Syy tähän lienee pitkälti siinä, että ambienttiseen menetelmään perustuvat laitteet eivät vaadi huomattavia jälkikäsittelylaitteita, kuten materiaalin kuivaus- tai lämmitysyksiköitä. Ambienttiseen menetelmään perustuvat laitteet eivät myöskään kuluta kalliita kemikaaleja. Tertiääriprosessointilaitteita vertailtaessa on muistettava, että ambienttiseen menetelmään perustuvilla laitteilla on kuitenkin omat haasteensa hyvin hienon ja puhtaan kumijauheen valmistamisessa.

2.7.3 Devulkanointimenetelmien päästöt

Kuten renkaiden hienontamisessa, myös devulkanoinnissa aiheutuvia ympäristöhaittoja voidaan tarkastella niissä syntyvien ilma-, nestemäisten ja kiinteiden päästöjen kautta. Tässä luvussa käsitellään devulkanointimenetelmien suoria ilma- ja nestemäisiä päästöjä siltä osin kuin niistä on ollut tietoa saatavana. Suoria kiinteitä päästöjä tai mahdollisia melu- ja hajuhaittoista ei raportoida informaation puutteen vuoksi. Välillisten päästöjen osalta tarkastellaan lyhyesti vain energiankulutuksesta syntyviä ilmapäästöjä.

Devulkanoinnissa voi syntyä suoria ilmapäästöjä hiukkaspäästöjen ja kaasujen muodossa. Hiukkaspäästöjä syntyy sellaisissa devulkanointimenetelmissä, joissa materiaalia prosessoidaan mekaanisesti. Tällaisia menetelmiä ovat mekaaninen, termomekaaninen, mekaaniskemiallinen sekä ultraääniaaltoihin ja mikroaaltoihin perustuva devulkanointi. Kaasuja syntyy puolestaan kaikissa devulkanointimenetelmissä, koska prosessoinnissa on aina mukana lämpöä. Mitä korkeampi lämpötila prosessissa vallitsee, sitä enemmän rengaskumissa olevia aineita kaasuuntuu. Tämän perusteella pienimmät päästöt aiheuttaa biologinen devulkanointi. Kemiallinen devulkanointi aiheuttaa suurimmat kaasupäästöt, koska renkaan sisältämien aineiden lisäksi prosessiin lisättyjä kemikaaleja voi kaasuuntuu. Esimerkiksi kemiallisina devulkanointiaineina käytetyt disulfidit voivat vapauttaa rikkivetyä, metyyliä tai muita tiölejä. (CalRecovery, Inc. 2004, 20, 50, 54–57.)

Välillisiä ilmapäästöjä syntyy devulkanointiin tarvittavan energian tuotannossa. Tämä johtaa eri devulkanointimenetelmien energiankulutuksien tarkasteluun. Jos energiantuotantomuoto oletetaan kaikissa prosesseissa samaksi, suurimmat kaasumaiset päästöt

syntyvät fysikaalisissa ja kemiallisissa menetelmissä, koska niissä energiankulutus on huomattavasti korkeampi kuin biologisessa menetelmässä. (Li et al. 2012, 1.)

Suoria nestemäisiä päästöjä syntyy kaikissa devulkanointimenetelmissä. Kemiallisessa ja biologisessa devulkanoinnissa nestemäisiä päästöjä syntyy, kun tuote erotetaan prosessointiaineesta (kemikaaleista tai lietteestä). Fysikaalisten devulkanointimenetelmien synnyttämät nestemäiset päästöt liittyvät puolestaan prosessin vaatimaan jäähdytystarpeeseen. Fysikaalisissa menetelmissä syntyy huomattava määrä lämpöä ja siksi prosessi vaatii yhteyteensä devulkanoidulle kumille tarkoitetun jäähdytysyksikön. Materiaali jäähdytetään yleensä vedellä, jota seuraa kuivaus. Koska jäähdytysveteen saattaa päätyä tuotteesta haitallisia aineita, täytyy jäähdytysvesi käsitellä jäteveden tavoin. (CalRecovery, Inc. 2004, 20, 50–51, 57.)

2.7.4 Devulkanointimenetelmien kustannustehokkuus

Devulkanointimenetelmistä biologista prosessia voidaan pitää kustannustehokkaimpana, sillä luonnollisena prosessina se ei juuri kuluta energiaa tai aiheuta muita suuria toimenpiteitä, jolloin menetelmän käyttökustannukset jäävät pieniksi (Li et al. 2012, 1). Kuten luvussa 2.6.1 on todettu, sen avulla devulkanointireaktio voidaan kohdistaa myös koskemaan ainoastaan rikkisidoksia, jolloin paras mahdollinen devulkanointituloksa voidaan saavuttaa (Stevenson et al. 2008, 4–5). Korkean devulkanoitumisasteen saavuttamiseksi prosessiin syötettävältä materiaalilta edellytetään kuitenkin erittäin pientä partikkelikokoa, mikä lisää devulkanointia edeltäviä kustannuksia (De et al. 2005, 423–424). Lisäksi biologinen prosessi on hyvin hidas eli se kestää useita päiviä (CalRecovery, Inc. 2004, 20), mikä huonontaa tuotannon tehokkuutta.

Fysikaaliset ja kemialliset menetelmät ovat nopeampia, esimerkiksi ultraäänidevulkanointi kestää vain muutamia sekunteja (De et al. 2005, 330), termokemiallinen prosessi puolestaan muutamia minuutteja (Saiwari 2013, 82). Näin ollen näillä prosesseilla voidaan tuottaa enemmän devulkanoitua kumia verrattain lyhyessä ajassa. Fysikaaliset ja kemialliset prosessit kuitenkin kuluttavat huomattavasti energiaa, ja täten niiden käyttökustannukset ovat suuremmat. Verrattaessa fysikaalisia ja kemiallisia menetelmiä keskenään fysikaalisten prosessien investointi- ja käyttökustannusten sanotaan olevan pienemmät kuin kemiallisten prosessien (CalRecovery, Inc. 2004, 34). Tähän vaikuttaa todennäköisesti eniten kemikaalien käyttö. Lisäksi verrattaessa fysikaalisten prosessien

sisällä ultraäänidevulkanointia mekaanisiin devulkanointimenetelmiin, ultraääniaaltodevulkanoinnissa investointikustannukset ovat lähes kaksinkertaiset, käyttökustannusten ollessa samaa luokkaa (CalRecovery, Inc. 2004, 34). Ultraääniaaltodevulkanointia lu-
kuun ottamatta kemiallisilla prosesseilla voidaan kuitenkin saada parempia devul-
kanointituloksia kuin fysikaalisilla prosesseilla (Saiwari 2013, 23).

3 TUTKIMUSAINEISTO JA TUTKIMUSMENETELMÄT

3.1 *Kirjallisuusselvitys*

Kirjallisuusselvityksen tarkoituksena oli selvittää sopivat menetelmät renkaista jauhetujen kumipartikkelien pintaominaisuuksien tutkimiseen. Lisäksi tarkoituksena oli kerätä tietoa eri murskausmenetelmillä tuotettujen partikkelien tarkemmasta luonteesta. Kirjallisuusselvityksen tekemisessä hyödynnettiin alan kirjallisuutta sekä sieltä löydettyjä aiemmin suoritettuja tutkimuksia kumipartikkelien pintaominaisuuksista. Kirjallisuudesta löydettyjen aikaisempien kokemusten pohjalta päätettiin laboratoriossa käytetyistä tutkimusmenetelmistä. Kirjallisuudessa esitettyjä tietoja kumipartikkelien pintaominaisuuksista puolestaan käytettiin vertailuarvoina tässä työssä saatuihin tuloksiin.

3.2 *Laitosvierailut ja haastattelut*

Laitosvierailujen tarkoituksena oli tutustua kahteen renkaiden murskauslaitokseen, joiden pääasiallisena tarkoituksena oli tuottaa kumigranulaattia sekalaisista vanteettomista ajoneuvojen renkaista, sekä kerätä tietoa näiden laitosten prosessi- ja tuoteominaisuuksista vertailua varten. Laitosvierailuilla tiedonkeruu tapahtui i) laitokseen jalkautumalla ja tällä tavoin prosessiin suoraan tutustumalla, sekä ii) laitoskierroksesta vastannutta henkilöä haastatteleamalla niin kierroksen aikana kuin sen jälkeenkin.

Vierailujen kohteena olleet laitokset valittiin Kuusakoski Oy:n mielenkiinnon mukaan. Laitosten valintaan vaikuttivat myös laitoksissa käytettyjen sekundääriprosessointilaitteiden keskinäinen eroavuus, laitosten sijainti Euroopassa sekä tietenkin laitosten oma halukkuus ottaa osaa tutkimukseen.

Laitosvierailut ajoittuivat loppukevälle 2015 seuraavan aikataulun mukaisesti: 13.4.2015 (laitos 1) ja 9.6.2015 (laitos 2). Laitokset esitetään numeroin niiden tunnistamattomuuden takaamiseksi. Molemmat laitosvierailut kestivät noin yhden työpäivän, jonka aikana kierrettiin renkaiden murskausprosessi läpi. Vierailujen aikana laitokset toimivat normaalisti, eikä niissä tehty erityistoimenpiteitä.

3.3 Laboriokokeet

3.3.1 Mittausten tavoite ja toteutus

Laboriokokeiden tarkoituksena oli tutkia vierailujen kohteina olleilta laitoksilta saatuja kumipartikkeleita niiden muotoon ja pinnankarheuteen perustuen. Laboriome-netelminä käytettiin mikroskooppitarkasteluja, jotka valittiin yhteistyössä Kuusakoski Oy:n ja Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) materiaaliopin laitoksen henkilökunnan kanssa. Mikroskooppitarkasteluissa hyödynnettiin parhaita mahdollisia nykyaikaisia standardeja ja laitteita. Mikroskooppitarkasteluissa huomioitiin myös kirjallisuudesta löytyneitä aikaisempia tutkimuksia ja niiden koejärjestelyjä sekä Tampereen teknillisen yliopiston kokemuksia rengaskumin ja muiden materiaalien pintaominaisuuksien tutkimisesta. Mikroskooppitarkasteluissa käytetyt mikroskoopit olivat

- 1) Philipsin XL-30 pyyhkäisyelektronimikroskooppi (SEM, engl. scanning electron microscope), jolla tutkittiin halkaisijaltaan alle 250 µm partikkeleita
- 2) Leican MZ 7.5 stereomikroskooppi, jolla tutkittiin halkaisijaltaan 250–2800 µm partikkeleita.

Käytettyjen mikroskooppien tarkemmat kuvaukset löytyvät luvuista 3.3.2 ja 3.3.3.

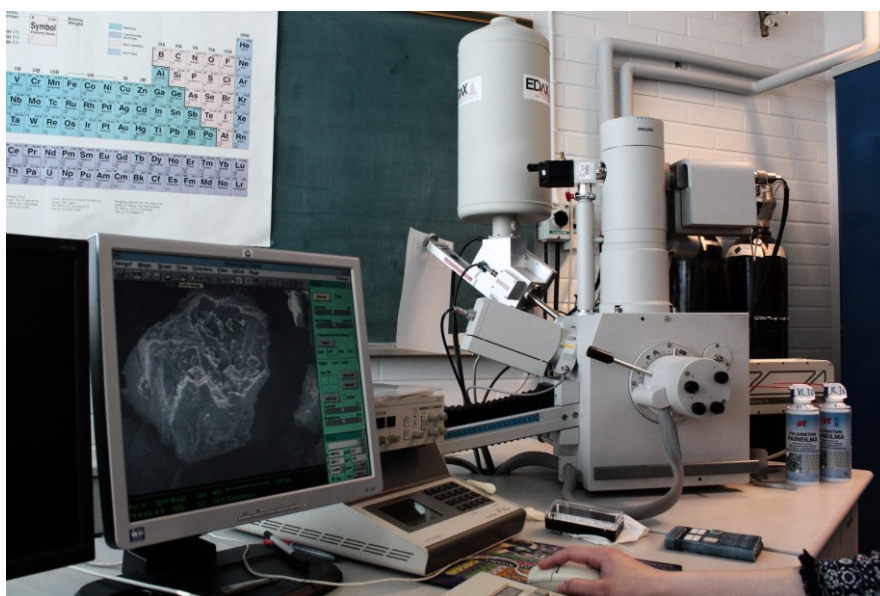
Laboriokokeet suoritettiin toukokuun 2015 aikana Taulukon 11 mukaisesti. Pyyhkäisyelektronimikroskooppimittaukset suoritti projektitutkija Sarianna Rönkkö TTY:ltä. Diplomityöntekijä oli mukana avustamassa ja seuraamassa SEM-mikroskopiakuvauksia. Stereomikroskooppimittaukset diplomityöntekijä suoritti kokonaan itse.

Taulukko 11. Laboratoriokokeiden toteutus.

Mittaus	Laite	Paikka & mittauksen suorittaja	Ajankohta
Kumipartikkelien muoto ja pinnan- karheus ($\phi < 250 \mu\text{m}$)	Pyyhkäisyelektroni- mikroskooppi (SEM)	TTY/Materiaaliopin labo- ratorio, Korkeakoulunka- tu 6, 33101 Tampere; Sarianna Rönkkö	28.5.2015
Kumipartikkelien muoto ja pinnan- karheus ($\phi 250\text{--}2800 \mu\text{m}$)	Stereomikroskooppi	TTY/Materiaaliopin labo- ratorio, Korkeakoulunka- tu 6, 33101 Tampere; Diplomityöntekijä	28.5.2015

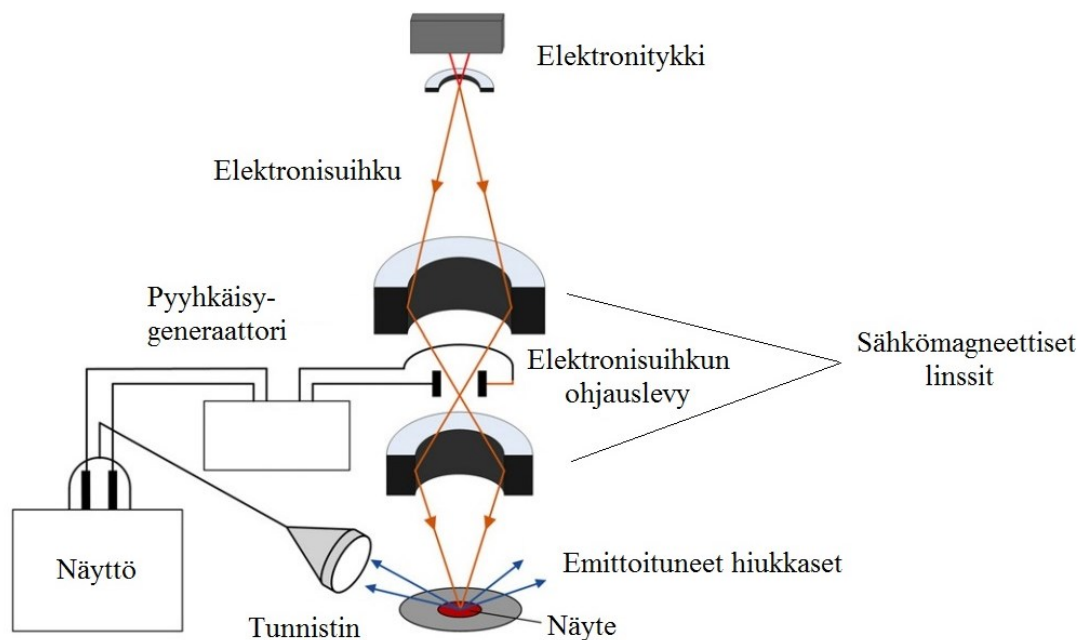
3.3.2 Pyyhkäisyelektronimikroskoopin toimintaperiaate

Pyyhkäisyelektronimikroskooppi (Kuva 17) on mikroskooppi, joka on suunniteltu erityisesti näytteiden pintarakenteiden tutkimiseen. Pyyhkäisyelektronimikroskoopilla pysytään tarkastelemaan näytteiden pintarakenteita jopa 10–200 000 -kertaisella suurenosalueella, jossa muodostettavan kuvan syvyystarkkuus on samanaikaisesti noin 100–1000 -kertainen perinteiseen optiseen mikroskooppiin verrattuna. (Tampereen teknillinen yliopisto 2015.)



Kuva 17. Philipsin XL-30 pyyhkäisyelektronimikroskooppi toiminnassa.

Pyyhkäisyelektronimikroskoopin toiminta perustuu elektronitykillä tuotettuun elektronisuihkuun, joka kohdistetaan sähkömagneettisilla linsseillä tyhjiössä olevan näytteen pinnalle. Elektronisuihkun halkaisija on hyvin pieni, noin 1 nm. Näytteen pinta pyyhkäistään elektronisuihkulla piste pisteeltä, jolloin elektronisuihkun ja näytteen välisten vuorovaikutusten seurauksena syntyy erilaisia hiukkasia, kuten takaisin sironneita elektroneja, sekundäärisiä elektroneja ja röntgensäteilyä. Näytteestä emittoituneiden hiukkasien intensiteetti mitataan ja kullekin pisteelle lasketaan kirkkaus, jonka avulla näytteen pinnasta luodaan mustavalkoinen elektroninen 3D-kuva tietokoneen näytölle. (FEI 2010, 4, 20; Stokes 2009, 17–18.) Pyyhkäisyelektronimikroskoopin rakennetta on havainnollistettu Kuvassa 18.



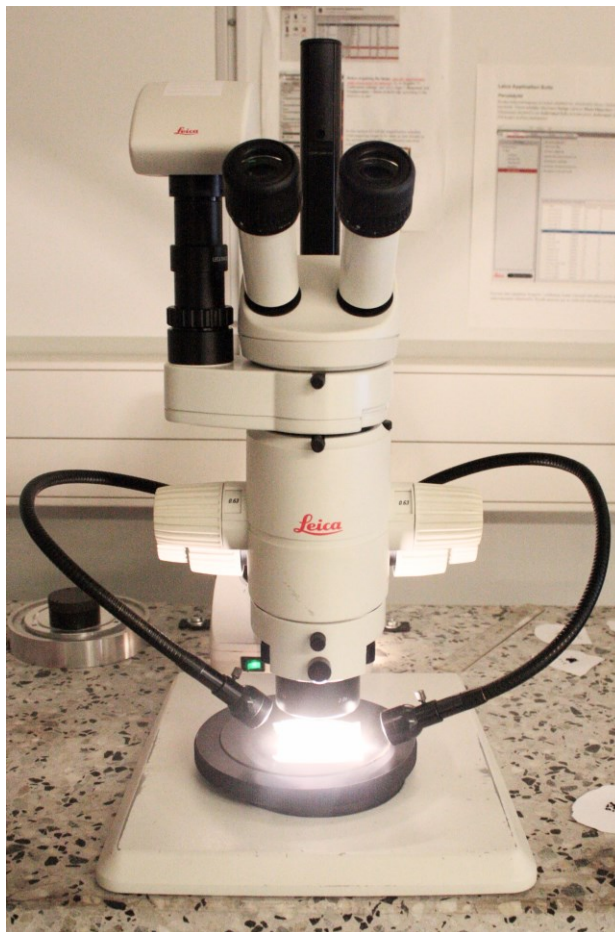
Kuva 18. Pyyhkäisyelektronimikroskoopin rakenneosat (Muokattu lähteestä Zhu et al. 2014, 2).

Pyyhkäisyelektronimikroskoopilla tutkittavien näytteiden tulee olla puhtaita, kuivia ja ainakin pinnaltaan sähköä johtavia. Sähköä johtamattomat näytteet muutetaan keinotekoisesti johtaviksi pinnoittamalla ne ohuella johtavalla kerroksella, kuten metallikerroksella. Sähköä johtavina näytteet eivät varaudu elektronipommituksessa ja täten niistä on mahdollista saada tarkka kuva. Tutkittavien näytteiden täytyy olla myös riittävän pienikokoisia ja kestää tyhjiökammion olosuhteita. Kokovaatimukset syntyvät 1) näytealustan pienestä halkaisijasta ja tätä kautta edustavan näytteen aikaansaamisesta, sekä 2) mahdollisen pinnoituksen onnistumisvarmuudesta: isojen ja epäsäännöllisten partikkeli-

en pinnoitus ei välttämättä onnistu riittävän hyvin ja näin näytteen varautumista ei voida estää. Tyypillisesti pyyhkäisyelektronimikroskoopilla tutkittavat näytteet ovat halkaisijaltaan alle 100 µm. (FEI 2010, 24; Rönkkö 2015.)

3.3.3 Stereomikroskoopin toimintaperiaate

Stereomikroskooppi (Kuva 19) on mikroskooppi, joka soveltuu hieman isompien valoa läpäisemättömien näytteiden pintarakenteiden tutkimiseen. Stereomikroskooppi poikkeaa tavallisesta valomikroskoopista siten, että näytteeseen kohdistettu valo ei kulje näytteen läpi vaan heijastuu sen pinnasta synnyttäen kolmiulotteisen kuvan. Stereomikroskoopilla saavutettava tutkittavan näytteen suurennusalue riippuu käytetystä objektiivista. Esimerkiksi Kuvassa 19 olevassa Leican MZ 7.5 stereomikroskoopissa on 2x objektiivi, jonka avulla näytteiden pintarakenteiden tutkiminen 12,6–100 -kertaisella suurennosalueella on mahdollista. (Rönkkö 2015.)



Kuva 19. Leican MZ 7.5 stereomikroskooppi.

3.3.4 Näytteet ja näytteenotto

Laboratoriokokeissa tutkittuja kumipartikkelinäytteitä kerättiin kolmesta lähteestä: laitoksilta 1 ja 2 sekä eräältä kryomurskaimia myyvältä yritykseltä. Kryomurskaimia myyvän yrityksen näyte otettiin tutkimukseen mukaan ns. referenssinäytteeksi.

Pyyhkäisyelektronimikroskoopilla tutkittavia näytteitä oli laboratoriossa yhteensä kolme ja stereomikroskoopilla tutkittavia näytteitä yhteensä kahdeksan (Taulukko 12, Taulukko 13). Pyyhkäisyelektronimikroskoopilla tutkituista näytteistä kaksi oli peräisin laitosvierailujen kohteena olleilta laitoksilta 1 ja 2. Kolmas tutkittu näyte oli ns. referenssinäyte, joka oli peräisin erästä kryomurskaimesta. Stereomikroskoopilla tutkitut näytteet olivat peräisin laitoksilta 1 ja 2. Stereomikroskooppitutkimuksissa ei ollut mukana ns. referenssinäytettä.

Taulukko 12. Pyyhkäisyelektronimikroskoopilla tutkitut näytteet.

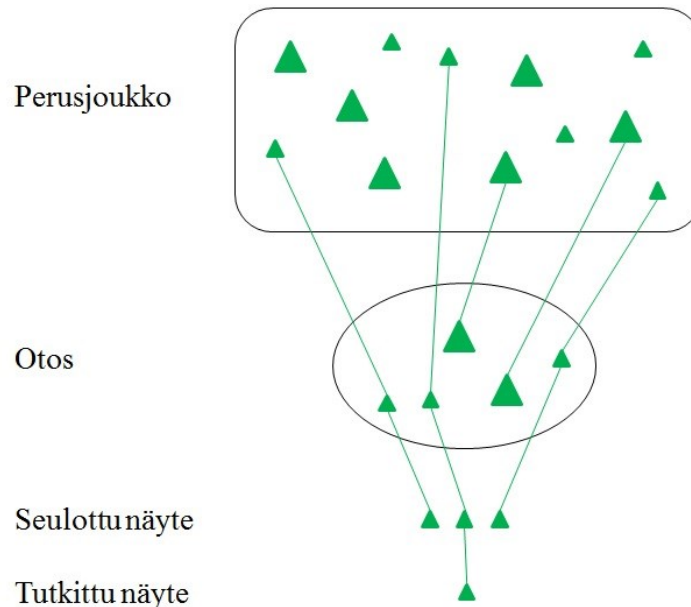
Näyte	Kokoluokka [μm]
Laitos 1	125–250
Laitos 2	125–250
Referenssinäyte	0–200

Taulukko 13. Stereomikroskoopilla tutkitut näytteet.

Näyte	Kokoluokka [μm]
Laitos 1, näyte 1	250–500
Laitos 1, näyte 2	500–1000
Laitos 1, näyte 3	1000–2000
Laitos 1, näyte 4	2000–2800
Laitos 2, näyte 1	250–500
Laitos 2, näyte 2	500–1000
Laitos 2, näyte 3	1000–2000
Laitos 2, näyte 4	2000–2800

Kaikkien näytteiden kohdalla näytteenottoprosessina käytettiin satunnaisnäyteprosessia, joka on esitetty pelkistettynä Kuvassa 20. Kuvassa 20 perusjoukko tarkoittaa lähteen näytteenottohetken materiaalivarastoa, josta otos kerättiin satunnaisotannalla. Otos sisälsi paljon hyvin erikokoisia partikkeleita. Jotta eri laitoksilla tuotettujen kumipartikke-

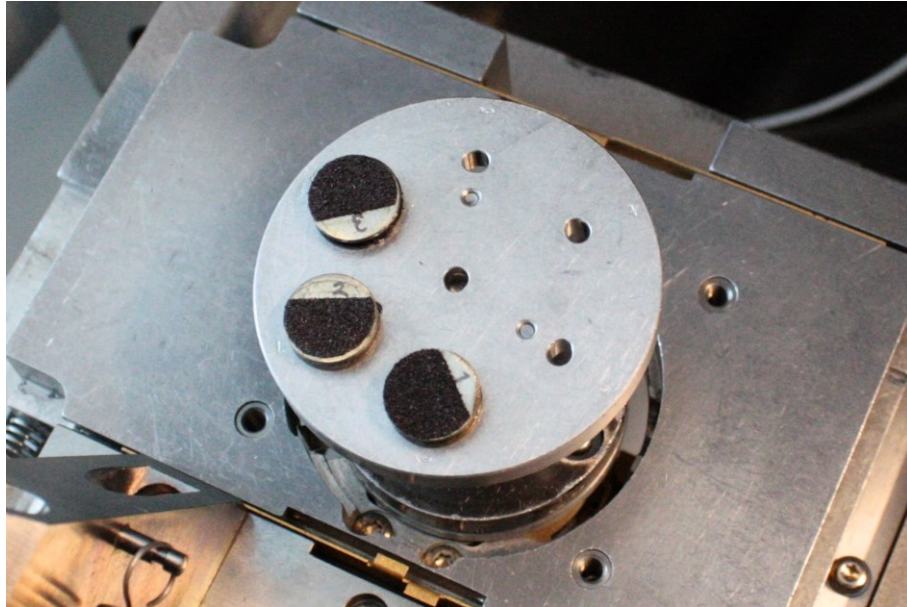
lien vertailu tapahtuisi mahdollisimman luotettavasti, otoksesta seulottiin mekaanisesti halutussa kokoluokassa oleva näyte. Seulotusta näytteestä valittiin lopulta satunnaisesti vain hyvin pieni määrä kumipartikkeleita lopulliseen tutkittavaan näytteeseen.



Kuva 20. Tutkimuksessa käytetty näytteenotto prosessi.

3.3.5 Näytteiden esikäsittely

Näytteet, joita tutkittiin stereomikroskoopilla, eivät vaatineet minkäänlaista esikäsittelyä. Pyyhkäisyelektronimikroskoopilla tutkitut näytteet sen sijaan tarvitsivat esikäsittelyä. Esikäsittelyssä näytteen sisältämät kumipartikkelit liimattiin hiililiimalla haluaisijaltaan 1 cm olevaan alustaan niin, että noin puolet alustasta oli näytteen peitossa (Kuva 21). Ylimääräiset kumipartikkelit puhallettiin pinnalta pois. Hiililiiman tarkoituksena oli pitää partikkelit paikallaan ja kuljettaa sähkö pois kumipartikkeleista. Koska kumipartikkelit eivät itse johtaneet sähköä, ne piti vielä käsitellä sähköä johtaviksi. Käsitteily tapahtui kultaamalla partikkelien pinta sputterointilaitteistossa alipaineen ja korkeajännitteen avulla. Sputterointiin käytetty aika oli 45 sekuntia. Käsitteilyn jälkeen näytteitä pidettiin kaksi päivää eksikaattorissa kosteuden poistamiseksi. Näytteet otettiin pois eksikaattorista juuri ennen mikroskooppitutkimuksen aloittamista.



Kuva 21. Esikäsitellyt kumipartikkelinäytteet valmiina pyyhkäiselektronimikroskooppianalyysiin.

4 TUTKIMUSTULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

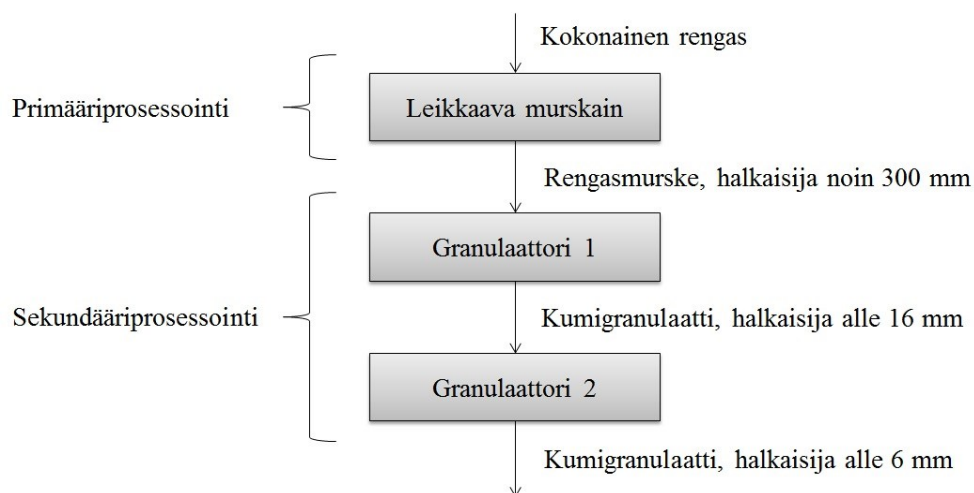
4.1 *Laitosvierailujen tulokset*

4.1.1 Laitoksen 1 prosessin kuvaus

Laitoksen 1 kumigranulaattia tuottava prosessi sijoittui täysin katettuun, pinta-alaltaan 9 000 m² suuruiseen, rakennukseen. Murskausprosessi toimi kokonaisuudessaan automaattisesti, ja prosessin yhteydessä työskenteleviä työntekijöitä tarvittiinkin ainoastaan valvomaan sen toimintaa tietokoneen ruuduilta. Laitoksen kapasiteetti oli 70 000 t/v, mutta tämän hetkinen tuotanto on noin 60 000 t/v. Tuotantoon vaikutti syötteenä olevien renkaiden koko. Laitosta ajettiin jatkuvassa kolmessa vuorossa. Liitteessä 2 on kuvia laitoksesta.

Syötteenä prosessissa käytettiin sekalaisia vanteettomia ajoneuvojen renkaiden. Suurin sallittu rengaskoko oli 710x38x70, eli renkaan maksimihalkaisija oli noin 2 000 mm. Myös tätä suuremmat renkaat kävivät prosessiin, mutta ne vaativat manuaalisen esimurskauksen, jossa renkaat pilkottiin aluksi muutamaan palaan.

Laitoksessa 1 materiaalin murskaus kokonaisesta renkaasta lopulliseen muotoonsa tapahtui kolmiportaisesti Kuvan 22 osoittamalla tavalla. Prosessi alkoi kahdella rinnakkaisella käsittelylinjalla, mutta haarautui ja yhdistyi useaan kertaan prosessin edetessä tehden täten tuotantolinjasta melko monimutkaisen. Laitoksessa oli murskaimia yhteensä 14; kaksi murskainta primääriprosessoinnissa ja 12 murskainta sekundääriprosessoinnissa.



Kuva 22. Laitoksen 1 murskausprosessi.

Primääriprosessointilaitteena laitoksessa 1 käytettiin kahta yksiroottorista leikkaavaa murskainta (Kuva 23). Rinnakkain asennetut leikkaavat murskaimet olivat ominaisuuksiltaan täysin yhteneväiset. Kummassakin roottorin pyörimisnopeus oli 20 rpm. Kapasiteetti vaihteli välillä 19–25 t/h ja energiankulutus välillä 12–70 kWh/t sen mukaan, minkä kokoisia renkaita prosessiin syötettiin. Koska leikkaavien murskainten kapasiteetti oli huomattavasti suurempi kuin sekundääriprosessointilaitteiden, leikkaavia murskaimia ei tarvinnut pitää käynnissä koko aikaa. Näin niiden käyttö voitiin ajoittaa ajalle, jolloin sähkön hinta oli alhaisinta. Leikkaavan murskaimen huoltotarve oli noin kerran kuussa eli noin 800 käyntitunnin välein.



Kuva 23. Laitoksessa 1 käytetty yksiroottorinen leikkaava murskain.

Primääriprosessointia seurasi kaksivaiheinen sekundääriprosessointi, jossa käytettiin hieman toisistaan poikkeavia granulaattoreita. Granulaattoreissa oli sahakuvioisilla terillä varustettu roottori. Granulaattorilla 1 rengasmurske jauhettiin ensin alle 16 mm kokoiseksi granulaatiksi ja sitten granulaattorilla 2 alle 6 mm kokoiseksi granulaatiksi. Koska renkaiden hienontamiseen käytettyjen laitteiden kapasiteetti pieneni prosessoitavan materiaalin pienentyessä, granulaattoreita tarvittiin useampia kuin leikkaavia murskaimia. Näin ollen granulaattoreita 1 oli koko prosessissa rinnakkain neljä, ja granulaattoreita 2 kahdeksan. Granulaattorien huoltotarve oli samaa luokkaa leikkaavan murskaimen kanssa. Taulukossa 14 on vertailtu granulaattorien 1 ja 2 ominaisuuksia.

Taulukko 14. Sarjaan asennettujen granulaattorien 1 ja 2 ominaisuuksia.

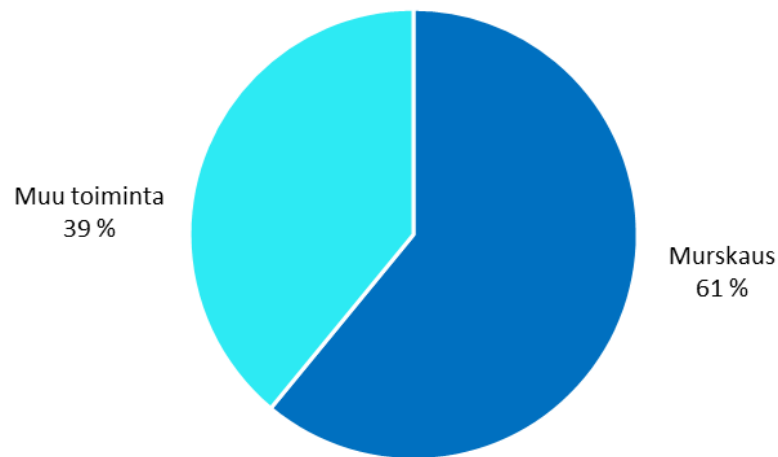
Laiteominaisuus	Sekundääriprosessointilaite	
	Granulaattori 1	Granulaattori 2
Kapasiteetti [t/h]	3	0,3–1
Roottorin pyörimisnopeus [rpm]	140	270
Energiankulutus [kWh/t]	4–6	10–33
Yksiköiden lukumäärä laitoksessa [-]	4	8

Murskainten lisäksi laitoksessa 1 oli useita materiaalin puhdistukseen ja seulontaan tarkoitettuja yksiköitä. Seuloja löytyi leikkaavan murskaimen ja molempien granulaattorien yhteydestä sekä granulaattorin 2 jälkeen. Murskainten yhteydessä olevien seulojen tarkoituksena oli pitää huoli siitä, ettei liian suurikokoinen kumimateriaali päässyt jatkamaan matkaa seuraavaan vaiheeseen. Granulaattorin 2 jälkeisten seulojen tarkoituksena oli puolestaan jaotella materiaali partikkelikokonsa perusteella eri fraktioihin.

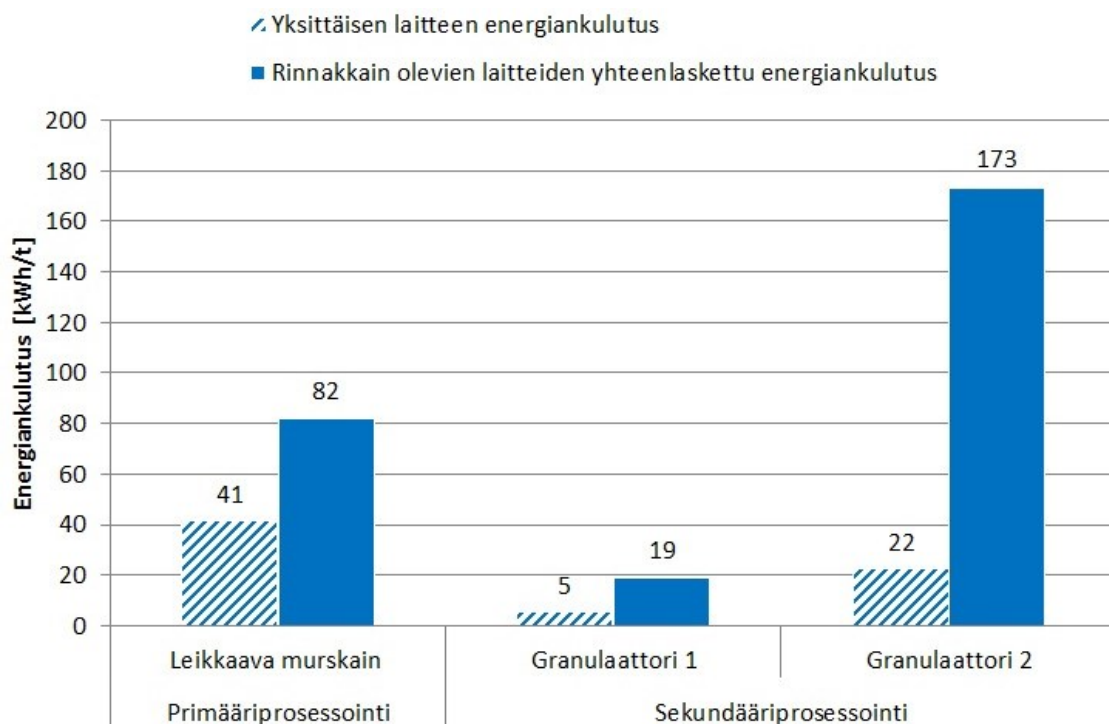
Laitoksessa 1 käytettyjen puhdistusyksikköjen tarkoituksena oli erotella metalli, tekstiili ja muut epäpuhtaudet (kuten kivet) kumista. Puhdistusyksiköt koostuivat pääasiassa erilaisista tärinäpedeistä, ilmaerottimista ja magneeteista. Suurin osa puhdistusyksiköistä oli granulaattorin 2 jälkeen, mutta esimerkiksi metallia poistettiin pitkälti materiaalivirrasta jo granulaattorin 1 jälkeen. Tällöin kumipartikkelit, jotka sisälsivät paljon metallia, eroteltiin muusta materiaalista ja murskattiin niille erikseen suunnitellussa ns. teräsgranulaattorissa. Teräsgranulaattorin tuotteena saatu puhdas kumi palautettiin prosessiin ja metalli kerättiin talteen. Kaikki laitoksessa 1 käytetyt murskaimet sekä puh-

distus- ja seulontayksiköt oli alun perin ostettu ulkopuolisilta laitevalmistajilta, mutta vuosien varrella laitteita oli muokattu niiden tehokkuuden lisäämiseksi.

Laitoksen 1 kokonaisenergiankulutus oli noin 451 kWh/t. Energiasta suurin osa kului materiaalin murskaukseen, jolloin muun toiminnan, kuten materiaalien puhdistuksen, seulonnan ja kuljetuksen osuus jäi pienemmäksi (Kuva 24). Murskaustoiminnan energiankulutuksesta noin 30 % kului primääriprosessoinnissa ja 70 % sekundääriprosessoinnissa. Sekundääriprosessoinnin energiankulutuksesta suurin osa tapahtui granulaattoreissa 2 (63 %) ja vain murto-osa granulaattoreissa 1 (7 %). Kuva 25 havainnollistaa murskaustoimintaan käytetyn energian jakautumista eri murskainten kesken.



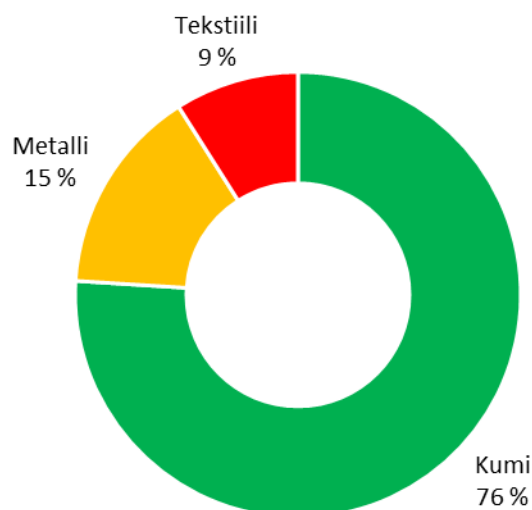
Kuva 24. Laitoksen 1 kokonaisenergiankulutuksen (451 kWh/t) jakautuminen murskaustoiminnan ja muun toiminnan kesken. Murskaustoimintaan kulutettu energia vastaa murskaimille annettujen energiankulutusten vaihteluvälien keskiarvoja.



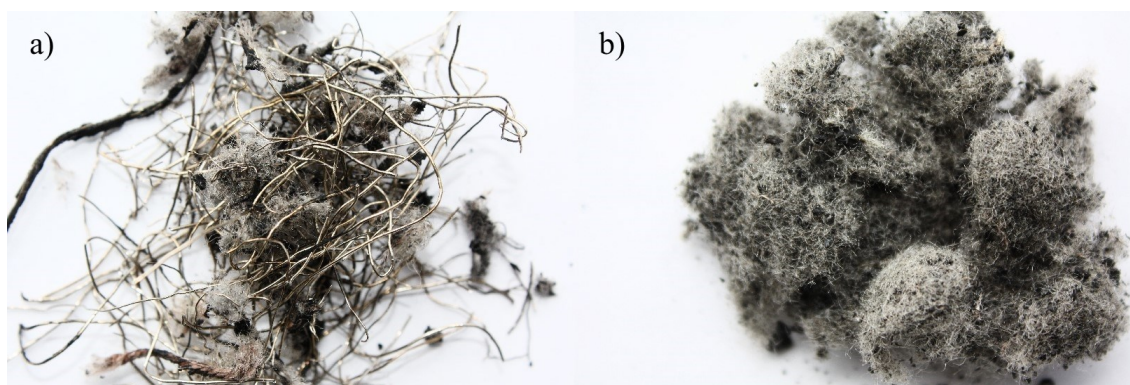
Kuva 25. Murskaukseen käytetyn energian (275 kWh/t) jakautuminen eri laitteille ja eri prosessivaiheiden kesken. Murskaustoimintaan kulutettu energia vastaa murskaimille annettujen energiankulutusten vaihteluvälien keskiarvoja.

4.1.2 Laitoksen 1 lopputuotteet

Laitoksen 1 lopputuotteina saatiin kumia, metallia ja tekstiiliä (Kuva 26). Jätteiksi luokiteltavien epäpuhtauksien, kuten hiekan ja kivien, määrä oli hyvin pieni suhteessa muihin materiaaleihin. Johtuen laitoksella 1 käytetyistä useista puhdistusyksiköistä, laitokselta saadut lopputuotteet olivat hyvin puhtaita, jonka vuoksi niiden suora hyödyntämisaste oli 100 %. Kumi hyödynnettiin pääasiassa tekonurmikentissä ja leikkikenttien pohjaratkaisuissa, metalli (Kuva 27a) terässlatoilla uuden teräksen valmistuksessa ja tekstiili (Kuva 27b) sementtiuuneissa energian lähteenä. Tekstiilin hyötykäyttöä äänieristemateriaalina kaavailtiin alkavaksi lähitulevaisuudessa. Prosessista saadut jätteiksi luokitellut epäpuhtaudet loppusijoitettiin kaatopaikalle.

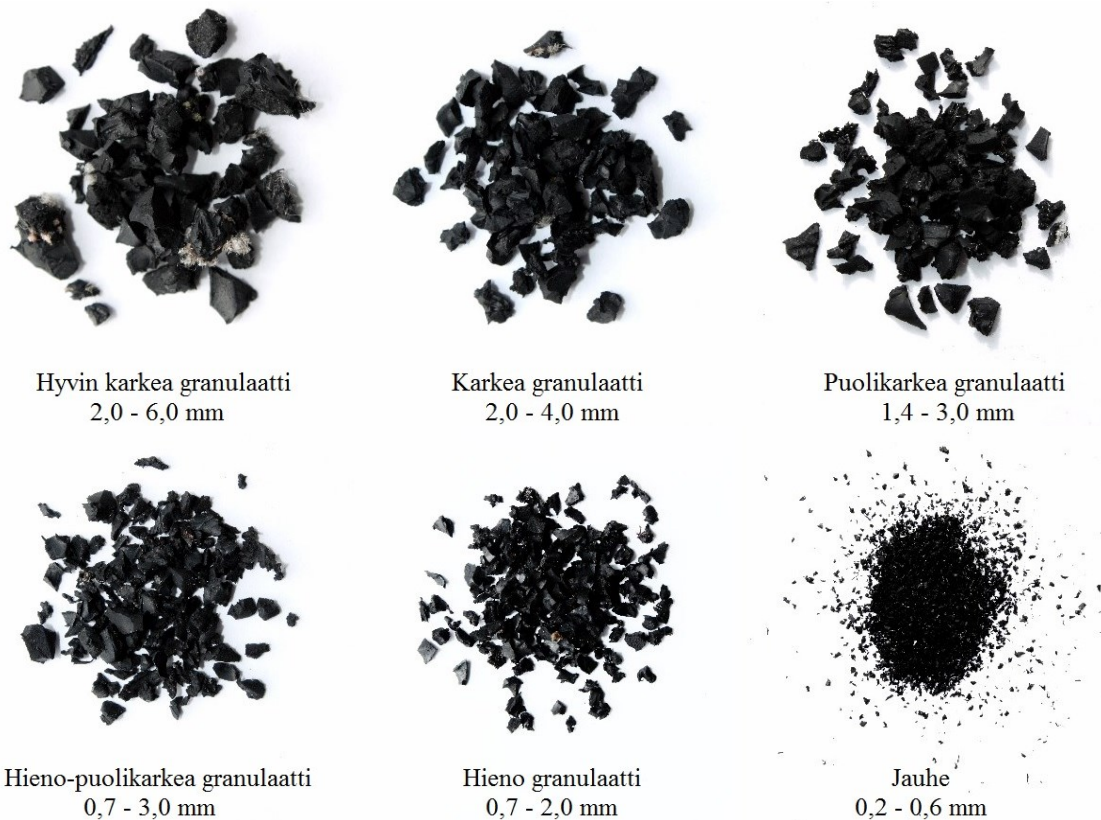


Kuva 26. Lopputuotteiden määrällinen jakautuminen laitoksella 1.

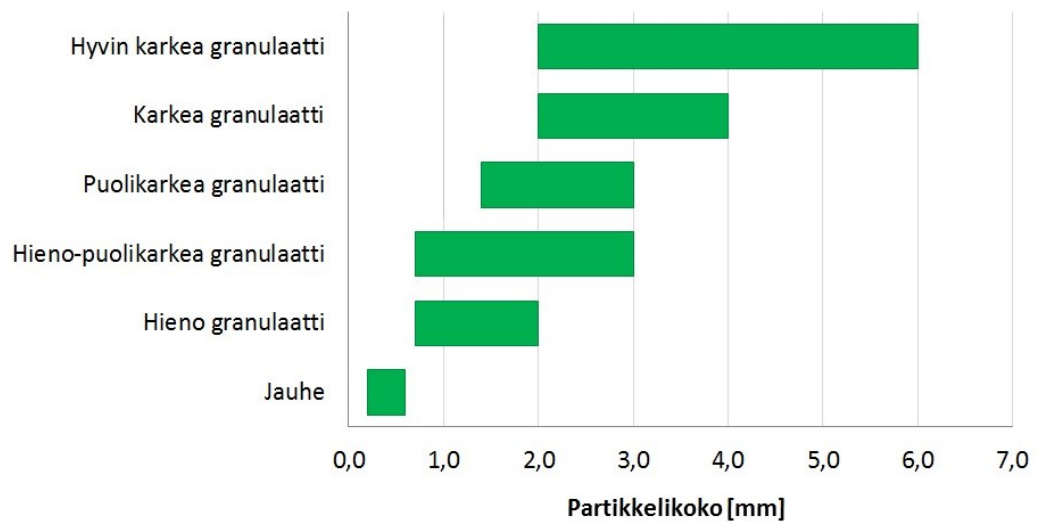


Kuva 27. Laitokselta 1 saatavaa a) metallia ja b) tekstiiliä.

Laitoksella 1 tuotetun kumimateriaalin partikkelikoko vaihteli 0,2 mm ja 6,0 mm välillä. Tämä materiaali seulottiin laitoksella kuuteen eri tuotefraktioon, joista viisi luettiin kokonsa puolesta kumigranulaatiksi ja yksi kumijauheeksi (Kuva 28, Kuva 29). Laitoksessa tuotettujen kumipartikkelien tarkkaa kokojakaumaa oli vaikea määritellä, koska se riippui prosessiin syötettävästä materiaalista ja laitoksen tarkoista prosessiolosuhteista, joita kontrolloitiin myynnin mukaan. Laitoksella tuotettujen kumigranulaattien tuotekohtaiset kokojakaumat on kuitenkin esitetty Liitteessä 3. Kyseisessä murskausprosessissa tuotettua kumijauhetta pidettiin sivutuotteena, sillä sen markkinapotentiaali oli osin kartoittamatta ja täten kysyntä ei ollut niin suurta kuin muilla tuotteilla. Kumipartikkelien hinta oli noin 200 €/t riippumatta siitä mistä tuotefraktiosta oli kyse.



Kuva 28. Laitokselta 1 saatavat kumin tuotefraktiot.



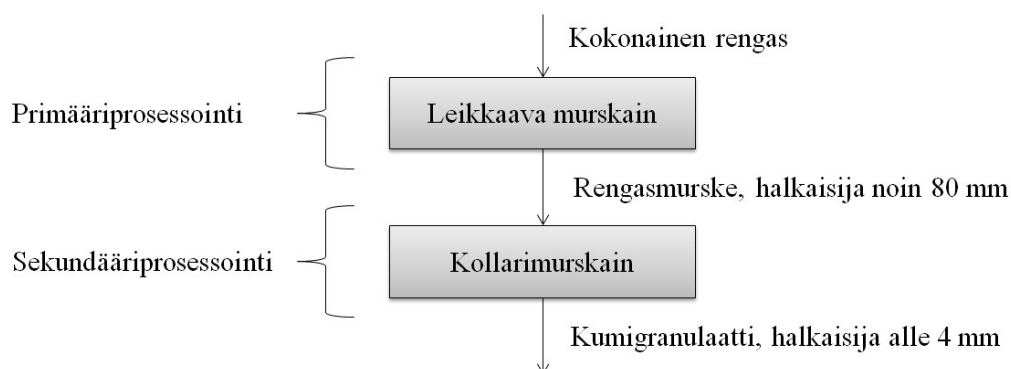
Kuva 29. Laitokselta 1 saatavien kumin tuotefraktioiden partikkelikoot.

4.1.3 Laitoksen 2 prosessin kuvaus

Laitos 2 oli sijoitettu osittain katettuun rakennukseen ja osittain taivasalle niin, että ulkoalueen pinta-ala oli 6 000 m² ja sisätilan 935 m². Katetun rakennuksen korkeus oli 11 m. Suurin osa toiminnoista tapahtui katetussa rakennuksessa, jolloin ulkoalue koostui lähinnä primääriprosessoinnista ja rengasmateriaalin säilytyksestä. Murskausprosessi

toimi primääriprosessointilaitteelle tapahtuvaa materiaalin syöttöä lukuun ottamatta täysin automaattisesti, ja prosessin yhteydessä työskenteleviä työntekijöitä tarvittiinkin pääasiassa vain huolehtimaan laitoksen siisteydestä sekä valvomaan sen toimintaa tietokoneen ruuduilta. Laitoksen 2 käsittelykapasiteetti oli noin 20 000–25 000 t/v. Laitoksen kapasiteettiin vaikutti syötteenä olevien renkaiden koko ja prosessissa tapahtuva takaisin kierrätettävän materiaalin määrä. Laitos toimi vuoden ympäri jatkuvatoimisesti. Liitteessä 4 on kuvia laitoksesta.

Syötteenä prosessissa käytettiin sekalaisia vanteettomia ajoneuvojen renkaita. Maksimihalkaisija prosessiin syötetylle renkaalle oli 1 500 mm. Myös tätä suuremmat renkaat kävivät prosessiin, mutta ne vaativat manuaalisen esimurskauksen, jossa renkaat pilkottiin muutamaaan palaan. Laitoksessa 2 materiaalin murskaus kokonaisesta renkaasta lopulliseen muotoonsa tapahtui kaksipuolaisesti Kuvan 30 osoittamalla tavalla. Prosessi alkoi yhdellä käsittelylinjalla, mutta se haarautui prosessin lopussa erilaisten tuotteiden mukaan. Koko laitoksessa oli murskaimia yhteensä kaksi; yksi murskain primääriprosessoinnissa ja yksi sekundääriprosessoinnissa.



Kuva 30. Laitoksen 2 murskausprosessi.

Primääriprosessointilaitteena laitoksessa 2 käytettiin kaksiroottorista leikkaavaa murskainta (Kuva 31). Leikkaavan murskaimen kapasiteetti oli noin 15 t/h ja roottorin pyörimisnopeus noin 30–35 rpm. Leikkaavan murskaimen huoltoväli oli tyypillisesti alle 1 000 h. Laitoksen 2 sekundääriprosessointilaitteena käytettiin kollarimurskainta. Käytetty kollarimurskain oli halkaisijaltaan 1 500 mm. Sen kapasiteetti oli 3,5 t/h. Kollarimurskaimen tyypillinen huoltoväli oli noin 2 000 h. Vaikka leikkaavan murskaimen kapasiteetti oli huomattavasti suurempi kuin käytetyn sekundääriprosessointilaitteen, myös sitä pidettiin käynnissä koko ajan, sillä kaikki tuotteena saatu rengasrouhe ei

mennyt kollarimurskaimen syötteeksi vaan osa myytiin sellaisenaan sementtiuuneille energiantuotantoon.

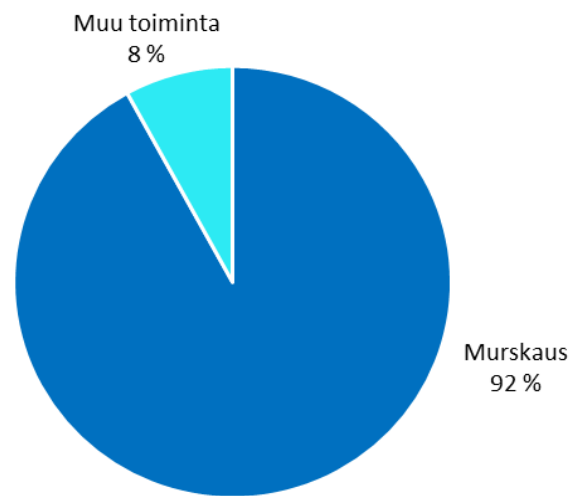


Kuva 31. Laitoksessa 2 käytetty kaksiroottorinen leikkaava murskain.

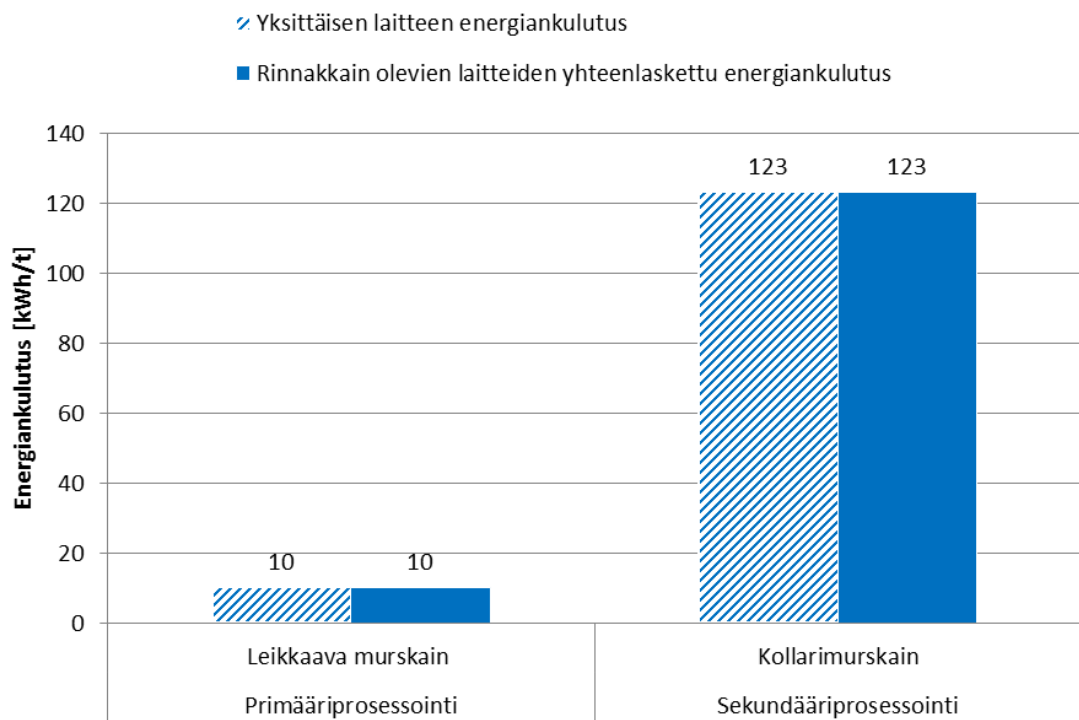
Murskainten lisäksi laitoksessa 2 oli useita materiaalin puhdistukseen ja seulontaan tarkoitettuja yksiköitä. Seuloja löytyi leikkaavan murskaimen ja kollarimurskaimen yhteydestä sekä kollarimurskaimen jälkeen. Murskainten yhteydessä olevien seulojen tarkoituksena oli pitää huoli siitä, ettei liian suurikokoinen kumimateriaali päässyt jatkamaan matkaa seuraavaan vaiheeseen vaan se palautui uudelleen murskattavaksi. Kollarimurskaimen jälkeisten seulojen tarkoituksena oli puolestaan jakaa materiaali haluttuihin tuotefraktioihin. Tällöin seulan yhteyteen oli myös sijoitettu magneetti metallin erottamiseksi. Kumipartikkelit, jotka sisälsivät yhä paljon metallia, voitiin edelleen tässä vaiheessa palauttaa kollarimurskaimeen parempaa jauhatusta ja epäpuhtauksien erotusta varten. Aivan prosessin lopussa kustakin tuotefraktiosta poistettiin tekstiili ilmaerottimien avulla. Kaikki laitoksessa 2 käytetyt murskaimet sekä puhdistus- ja seulontayksiköt oli ostettu ulkopuolisilta laitevalmistajilta.

Laitoksen 2 kokonaisenergiankulutus oli noin 144 kWh/t. Laitoksen 2 kokonaisenergiankulutuksesta yli 90 % kului materiaalin murskaukseen, jolloin muun toiminnan, kuten materiaalien puhdistuksen, seulonnan ja kuljetuksen osuus jäi hyvin pieneksi (Kuva 32). Murskaustoiminnan energiankulutuksesta noin 8 % kului primääriproses-

soinnissa ja 92 % sekundääriprosessoinnissa. Kuva 33 havainnollistaa murskaustoimintaan käytetyn energian jakautumista eri murskainten kesken.



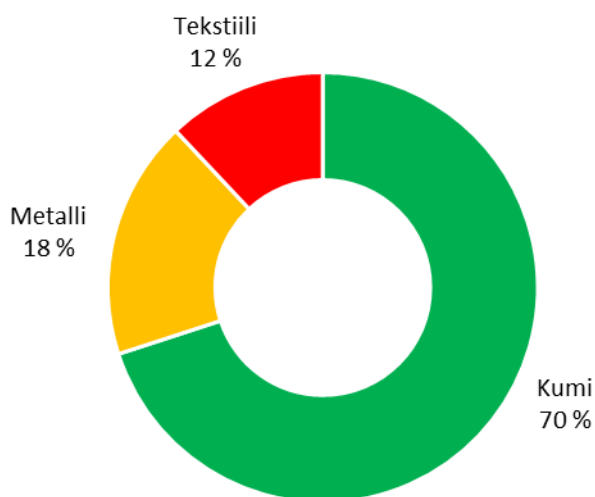
Kuva 32. Laitoksen 2 kokonaisenergiankulutuksen (144 kWh/t) jakautuminen murskaustoiminnan ja muun toiminnan kesken.



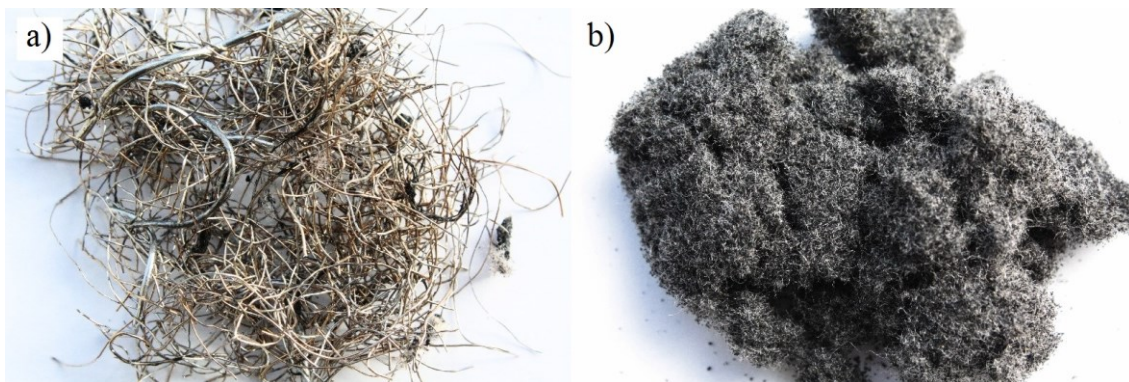
Kuva 33. Murskaukseen käytetyn energian (133 kWh/t) jakautuminen eri laitteille ja eri prosessivaiheiden kesken.

4.1.4 Laitoksen 2 lopputuotteet

Laitoksen 2 lopputuotteina saatiin kumia, metallia ja tekstiiliä (Kuva 34). Jätteiksi luokiteltavien epäpuhtauksien määrä oli hyvin pieni suhteessa muihin materiaaleihin. Jäte koostui suurimmaksi osaksi halkaisijaltaan alle 0,25 mm olevasta kumipölystä. Johtuen laitoksella 2 käytetyistä useista puhdistusyksiköistä, laitokselta saadut lopputuotteet olivat hyvin puhtaita, jonka vuoksi niiden suora hyödyntämisaste oli 100 %. Kumi hyödynnettiin pääasiassa leikkikenttien pohjaratkaisuissa ja muissa päällysteissä, erilaisissa valetuissa tuotteissa sekä tekonurmikentissä. Metallia (Kuva 35a) hyödynnettiin teräslatoilla uuden teräksen valmistuksessa ja tekstiili (Kuva 35b) sementtiuuneissa energian lähteenä. Jäte kuljetettiin polttolaitokselle.



Kuva 34. Lopputuotteiden määrällinen jakautuminen laitoksella 2.



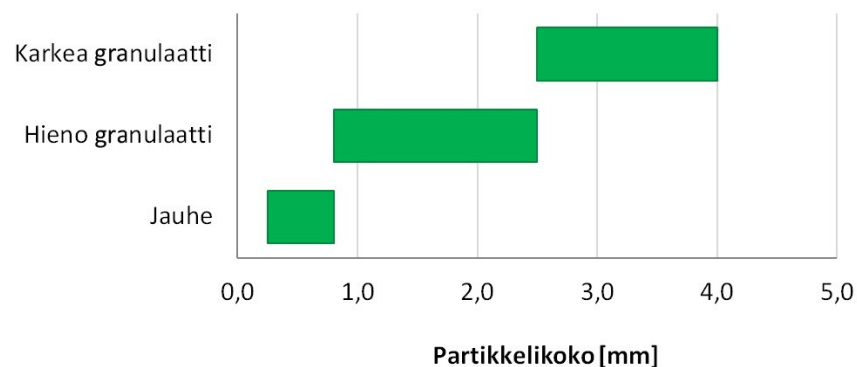
Kuva 35. Laitokselta 2 saatavaa a) metallia ja b) tekstiiliä.

Laitoksella 2 tuotetun kumimateriaalin partikkelikoko vaihteli 0,25 mm ja 4,0 mm välillä. Tämä materiaali seulottiin laitoksella kolmeen eri tuotefraktioon, joista kaksi luettiin

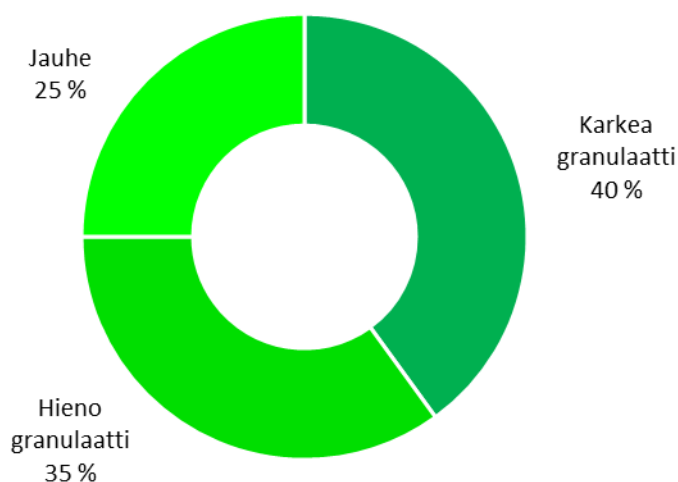
kokonsa puolesta kumigranulaatiksi ja yksi kumijauheeksi (Kuva 36, Kuva 37). Tuotefraktioiden määrällinen jakautuminen laitoksella 2 on esitetty Kuvassa 38. Tuotefraktioiden hinta vaihteli voimakkaasti 40–100 €/t välillä. Tuotefraktioiden hintaan vaikutti maa, johon tuote myytiin. Esimerkiksi Eurooppaan myydystä materiaalista sai yleisesti paremman hinnan kuin Aasiaan myydystä materiaalista. Suurimmat haasteet sopivien markkinoiden löytämiselle koettiin kumijauheen kanssa.



Kuva 36. Laitokselta 2 saatavat kumin tuotefraktiot.



Kuva 37. Laitokselta 2 saatavien kumin tuotefraktioiden partikkelikoot.



Kuva 38. Laitoksen 2 tuotefraktioiden jakautuminen.

4.2 Laitosvierailuilla saatujen tulosten tarkastelu

4.2.1 Laitosten 1 ja 2 laite- ja prosessierot

Laitosten 1 ja 2 prosessien vertailu tuotti tietyiltä osin haasteita, sillä laitoksen 1 kapasiteetti (60 000 t/v) oli noin 2,5-kertainen laitoksen 2 kapasiteettiin (20 000–25 000 t/v) verrattuna. Tämä vaikeutti esimerkiksi murskainten lukumäärään perustuvaa vertailua, sillä oletetusti isommalla laitoksella on enemmän murskaimia kuin pienemmällä. Näin ollen havainto, jonka mukaan laitoksessa 1 murskaimia oli moninkertainen määrä laitokseen 2 verrattuna, oli täysin ymmärrettävä. Tosin vaikka laitokset olisivat prosessoineet saman määrän renkaita vuositasolla, olisi laitoksessa 1 silti ollut enemmän murskaimia käytössään, sillä laitoksessa 1 murskaus tapahtui kolmiportaisesti kun taas laitoksessa 2 murskaus tapahtui kaksiportaisesti. Murskainten kokonaismäärää lisäsi myös se, että laitoksessa 1 käytettyjen sekundääriprosessointilaitteiden kapasiteetti oli pienempi kuin laitoksessa 2 käytetyn sekundääriprosessointilaitteen. Laitosten 1 ja 2 yksityiskohtainen vertailu on esitetty Liitteessä 5.

Molemmissa laitoksissa primääriprosessointilaitteena toimi leikkaava murskain. Laitoksessa 1 leikkaava murskain oli yksiroottorinen ja laitoksessa 2 kaksiroottorinen. Roottorien lukumäärästä huolimatta kummankin leikkaavan murskaimen yksittäiset kapasiteetti- ja energiankulutusominaisuudet olivat samaa suuruusluokkaa. Tarkasteltaessa murskaimille syötettävän ja murskaimilta saatavan materiaalin palakokoja huomattiin kuitenkin merkittäviä eroja: laitoksella 1 syötteenä käytetyt renkaat olivat halkaisijaltaan maksimissaan noin 2 000 mm ja tuotteena saatu rengasmursketuote noin 300 mm, kun

taas laitoksessa 2 vastaavat luvut olivat 1 500 mm ja 80 mm. Koska todennäköisesti prosessiin syötetyistä renkaista suurin osa oli henkilöauton renkaita, murskausprosessin tarkastelu on mahdollista yksinkertaistaa ajattelemalla syöte molemmilla laitoksilla yhteneväksi. Tällöin voidaan ajatella, että kaksiroottorisella murskaimella oli mahdollista saavuttaa pidemmälle viety murskausprosessi pienemmin kustannuksin kuin yksiroottorisella murskaimella, ja näin laitoksen 2 leikkaava murskain oli kustannustehokkaampi kuin laitoksen 1 leikkaava murskain.

Sekundääriprosessointilaitteena laitoksessa 1 käytettiin granulaattoreita ja laitoksessa 2 kollarimurskainta. Käytettyjen sekundääriprosessointilaitteiden murskaustekniikat erosivat merkittävästi toisistaan, sillä granulaattori perustui leikkaavaan menetelmään ja kollarimurskain repivään. Sekundääriprosessointilaitteita tarkasteltaessa kollarimurskain osoittautui kapasiteetiltaan suurimmaksi, jolloin niitä tarvittiin vähemmän prosessiin. Vähentämällä laitteiden määrää laitoksen investointikustannukset alenevat. Kollarimurskaimen murskausprosessia voitiin myös pitää suhteellisen tehokkaana, koska sen avulla pystyi murskaamaan primääriprosessointilaitteesta saadun rengasmurskeen yhdessä vaiheessa kumigranulaatiksi, kun taas laitoksessa 1 samaan työhön vaadittiin kaksi sarjassa olevaa granulaattoria. Vertailussa on kuitenkin huomioitava, että laitoksessa 2 sekundääriprosessointilaitteelle tullut materiaali oli huomattavasti pienemmässä kokoluokassa kuin laitoksessa 1 sekundääriprosessointilaitteelle tullut materiaali.

Verrattaessa laitosten 1 ja 2 huoltotarpeita toisiinsa, huomattiin, että huoltoväli laitoksen 2 sekundääriprosessointilaitteessa (kollarimurskain, ~ 2 000 h) oli huomattavasti suurempi kuin laitoksen 1 sekundääriprosessointilaitteissa (granulaattori 1 & 2, ~800 h). Molempien laitosten primääriprosessointilaitteissa huoltoväli oli samaa suuruusluokkaa (< 1 000 h). Laitoksen 2 ongelmana oli, että se sisälsi vain kaksi laitetta eli yhden murskauslinjan, jolloin prosessi pysähtyi muutamaksi tunniksi aina sekundääriprosessointilaitteen huollon aikana. Primääriprosessointilaitteen huolto ei sen sijaan aiheuttanut tuotantokatkoja, sillä primääriprosessointilaitte tuotti toimiessaan enemmän rengasmursketta kuin sekundääriprosessointilaitte ehti käsitellä, jolloin materiaalia jäi varastoon. Varasto mahdollisti materiaalin syötön muulla tavoin sekundääriprosessointilaitteelle. Laitoksessa 1 huolto ei koskaan pysäyttänyt prosessia täysin, sillä toiminta oli jaettu useampaan rinnakkaiseen linjaan. Sen sijaan murskainten suurempi määrä ja tiheämpi huolto

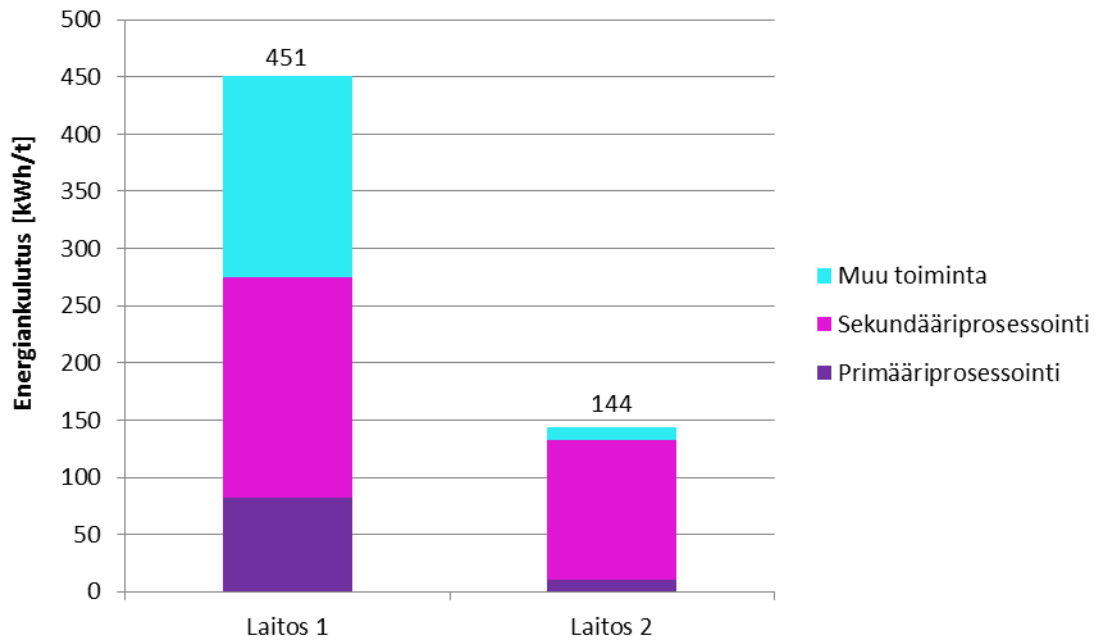
totarve takasivat sen, että huoltokustannukset laitoksessa 1 nousivat korkeammiksi kuin laitoksessa 2.

Laitosten 1 ja 2 ympäristövaikutusten ei uskottu poikkeavan merkittävästi toisistaan. Päästömäärät katsottiin myös niin vähäisiksi, ettei niiden tarkastelulle nähty tässä yhteydessä tarvetta.

4.2.2 Laitosten 1 ja 2 käyttöenergiantarpeen väliset erot

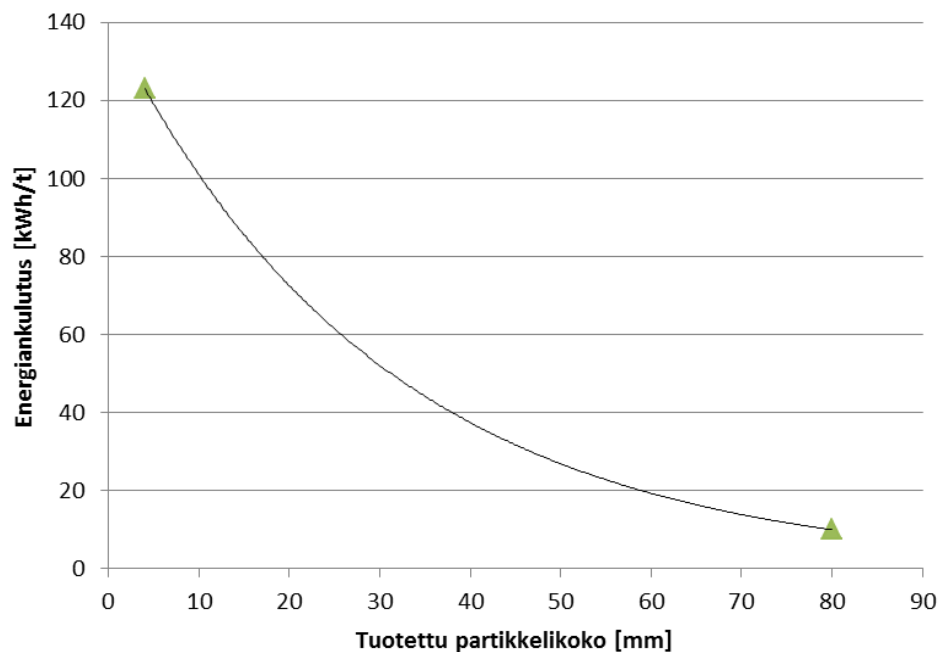
Laitosten 1 ja 2 kokonaisenergiankulutukset primääri- ja sekundääriprosessointiin (=murskaustoimintaan) sekä muuhun toimintaan jaoteltuna on esitetty Kuvassa 39. Kuvan 39 perusteella laitoksen 1 kokonaisenergiankulutus jokaista käsiteltyä kumitonnia kohden oli 307 kWh/t suurempi kuin laitoksessa 2. Tämä tarkoittaa, että laitos 1 kulutti energiaa noin 2,1-kertaisesti laitokseen 2 nähden. Ero laitosten kokonaisenergiankulutusten välillä tuntuu odotettua suuremmalta, mutta ainakin osin helposti selitettävissä olevalta. Alle on kerätty mahdollisia selityksiä suureen eroon:

- Prosessiin syötettävän renkaan maksimihalkaisija oli laitoksessa 1 suurempi kuin laitoksessa 2. Isojen renkaiden murskaus primääriprosessointilaitteessa kuluttaa enemmän energiaa kuin pienempien renkaiden käsittely, sillä ne ovat vahvempia. Hyvin isoja renkaita käsiteltäessä on myös mahdollista, että murskain ei ole tehokkaassa käytössä koko laajuudeltaan, jolloin ns. tyhjäkäyntiä voi tapahtua.
- Laitos 1 sijaitsi pohjoisemmassa kuin laitos 2, minkä vuoksi laitoksen 1 käsittelylinjalle saattoi tulla myös nastarenkaita. Nastarenkaissa nastojen erottaminen kumista lisää työn määrää.
- Laitos 1 oli kooltaan huomattavasti suurempi kuin laitos 2. Tämä lisää valaistukseen, materiaalinkuljetukseen yms. kulutettua energiamäärää.



Kuva 39. Laitosten 1 ja 2 kokonaisenergiankulutukset tuotettua kumitonnia kohden.

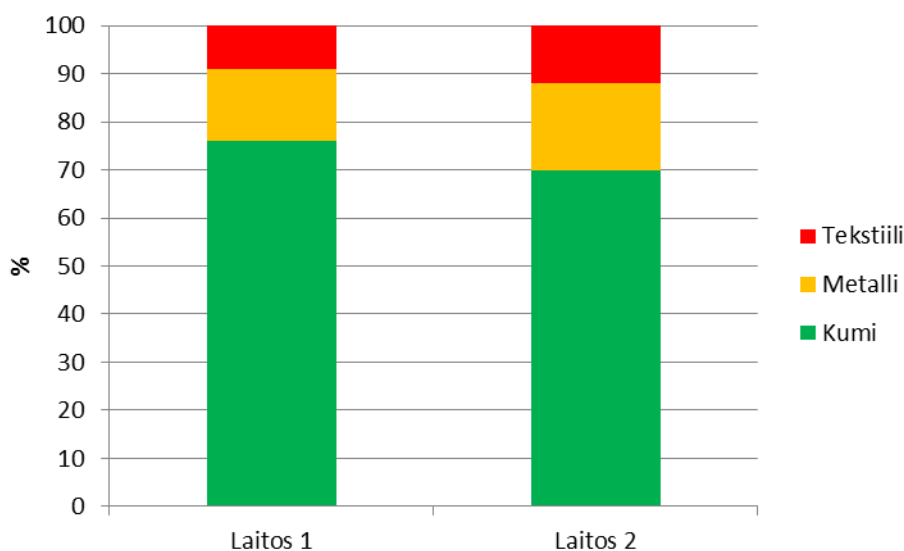
Kuva 40 havainnollistaa sitä, kuinka energiankulutus kasvaa eksponentiaalisesti tuotetun kumipartikkelin koon suhteen. Kuva 40 selittää myös Kuvassa 39 nähtävää merkittävää energiankulutuksen eroa primääri- ja sekundääriprosessointivaiheiden kesken. Yleisesti siis murskaimen tuottaessa pienempää partikkelikokoa, sen kapasiteetti laskee, mutta energiankulutus jokaista käsittelytonnia kohden nousee.



Kuva 40. Energiankulutus kasvaa eksponentiaalisesti tuotetun partikkelikoon kasvaessa (laitos 2).

4.2.3 Laitosten 1 ja 2 lopputuotteiden määrälliset ja laadulliset erot

Laitokset 1 ja 2 tuottivat pääasiassa kolmea lopputuotetta: kumia, metallia ja tekstiiliä (Kuva 41). Eri lopputuotteiden määrällinen jakautuminen laitoksissa muistutti toisiaan, sillä molemmissa kumin osuus oli reilusti yli 50 % kaikesta saannosta. Painoprosentuaalisesti toiseksi eniten laitokset tuottivat metallia ja sitten tekstiiliä. Lopputuotteiden määrällinen jakautuminen noudatti pitkälti renkaiden alkuperäistä koostumusta (vrt. Taulukko 2).



Kuva 41. Lopputuotteiden määrällinen jakautuminen laitoksilla 1 ja 2.

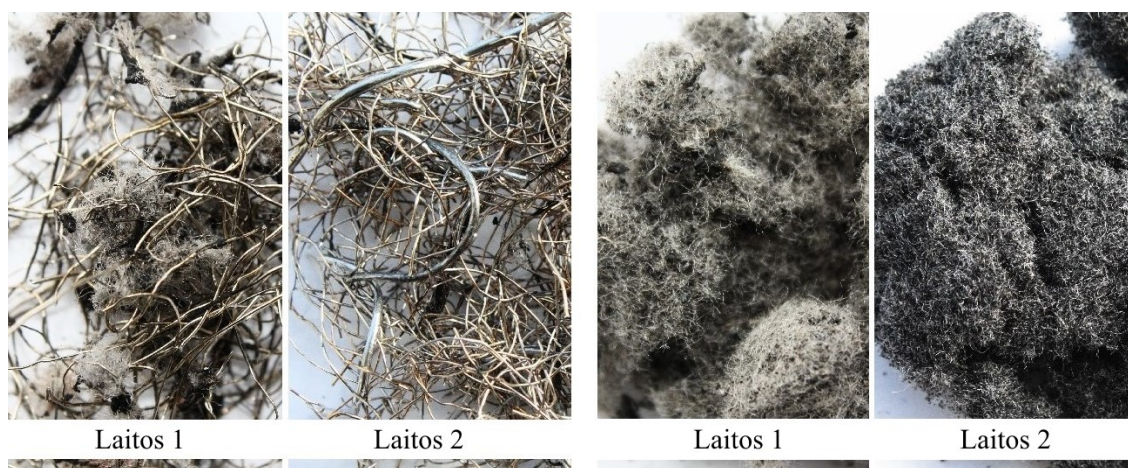
Vaikka lopputuotteiden jakautuminen eri laitoksissa muistutti yleisellä tasolla toisiaan, oli pieniä eroja huomattavissa. Laitoksessa 1 kumia tuotettiin noin 6 % enemmän kuin laitoksessa 2. Kumin osuuden kasvaessa, metallin ja tekstiilin osuudet jäivät laitoksessa 1 pienemmiksi kuin laitoksessa 2. Havaintoa voi selittää käsiteltävien renkaiden laadulla. Esimerkiksi käytöstä poistettujen renkaiden keräilyalueesta riippuen renkaat voivat päätyä kierrätykseen joko enemmän tai vähemmän kuluneina. Mitä pohjoisemmaksi maailmalla ja Euroopassa mennään, sitä vähemmän kuluneita renkaat yleensä ovat kierrätykseen saapuessaan, sillä vuodenaikaiset säävaihtelut vaativat renkaiden pitominaisuuksilta enemmän ja täten niiden kunnosta on pidettävä huolta. Mitä etelämmäksi puolestaan mennään, sitä useammin renkaiden kulutuspinna ajetaan puhki, jolloin kumia päätyy renkaiden mukana vähemmän kierrätyslaitokseen. Koska laitos 1 sijaitsi pohjoisemmassa kuin laitos 2, tämä saattoi hyvinkin vaikuttaa saantoon. Laitoksella 1 oli mahdollista käsitellä kooltaan suurempia renkaita, joka osaltaan myös saattoi vaikuttaa pieneen eroavaisuuteen lopputuotteiden jakautumisessa.

Tarkasteltaessa lähemmin laitoksilta saatua kumia, huomattiin, että laitos 2 tuotti kaapeamman kokojakauman materiaalia: laitoksessa 2 kumipartikkelien koko vaihteli välillä 0,25–4,0 mm, kun taas laitoksen 1 kumipartikkelien koko vaihteli välillä 0,2–6,0 mm. Laitoksen 1 osalta ei onnistuttu saamaan tietoa siitä, kuinka monta prosenttia mitäkin kokoluokkaa tuotettiin. Laitoksessa 2 kuitenkin alle 0,8 mm tuotteen osuudeksi saatiin noin 25 % kaikesta kumisaannosta. Koska laitoksessa 1 sekundääriprosessointi perustui leikkaavaan menetelmään ja laitoksessa 2 repivään menetelmään, voidaan olettaa, että laitoksessa 1 tuotettiin prosentuaalisesti vähemmän kumijauhetta. Molemmat laitokset myönsivät ambienttisin menetelmin tuotetun alle 1 mm jauheen myynnin haasteelliseksi. Tämä osoitti, että hienomman jauheen tuottaminen oli jokseenkin enemmän haitta kuin hyöty. Toisaalta alle 1 mm jauheen markkinapotentiaalia ei mahdollisesti vielä tunneta eikä osata täysimääräisesti hyödyntää. Tähän viittaa myös tuotteen suuri hintaero eri toimijoiden välillä.

Laitoksessa 1 tuotetut kumipartikkelit seulottiin kuuteen eri tuotefraktioon, laitoksessa 2 kolmeen. Huolimatta toisistaan poikkeavista tuotefraktioista, molemmilla laitoksilla kumi myytiin pääasiassa samoihin sovelluksiin. Laitoksessa 1 kuitenkin kumifraktioista saatavan myyntihinnan kerrottiin olevan huomattavasti korkeampi kuin laitoksessa 2. Syytä myyntihintojen suurelle erolle (noin 100 €/t) on vaikea varmuudella sanoa, sillä tuotteissa ei ainakaan paljain silmin tarkasteltaessa tuntunut olevan juuri mitään eroa. Yksi selitys saattaisi olla, että laitokset antoivat myyntihintansa eri muodoissa sen mukaan, sisältyivätkö hintaan esimerkiksi kuljetuskustannukset vai ei. Vallitsevaan hintaeroon on voinut vaikuttaa myös seuraavat tekijät:

- tuotefraktioiden kokoluokka
- tuotefraktioiden kokojakauma
- kumipartikkelien muoto ja/tai pintaominaisuudet
- kumipartikkelien puhtaus
- myynnin ja markkinoinnin onnistuneisuus
- ostaja
- kehittymättömät markkinat
- toimitusvarmuus ja kaupalliset ehdot.

Laitosten 1 ja 2 tuottamia metalli- ja tekstiilifraktioita on vertailtu Kuvassa 42. Kuvan 42 perusteella laitoksen 2 metalli vaikuttaa huomattavasti puhtaammalta kuin laitoksen 1 metalli. Tulosten perusteella voidaan olettaa, että laitoksessa 2 materiaalin puhdistusprosessi toimi paremmin. Havainnon myötä on myös mahdollista tehdä johtopäätös, että repivällä hienontamismenetelmällä (kollarimurskain) pystyy erottamaan epäpuhtaudet kumista paremmin kuin leikkaavalla menetelmällä (granulaattori). Tekstiilin osalta voitiin tehdä sama johtopäätös: laitoksen 2 materiaali näyttäisi sisältävän vähemmän kumipartikkeleita, joten siltä osin se on puhtaampaa. Laitoksen 2 tekstiili oli kuitenkin väriltään mustempaa, joka kuvastaa sitä, että tekstiilin joukossa on jonkin verran kumipölyä. Suuri kumipölyn määrä puolestaan vahvistaa edellä esitettyä oletusta siitä, että laitos 2 tuottaisi enemmän pieniä kumipartikkeleita kuin laitos 1. Huolimatta eroavaisuuksista metallin ja tekstiilin puhtausasteissa, materiaalit hyödynnettiin molemmilla laitoksilla täysin samoissa sovelluksissa: metalli terässulatoilla uuden teräksen valmistuksessa ja tekstiili sementtiuuneissa energian lähteenä.



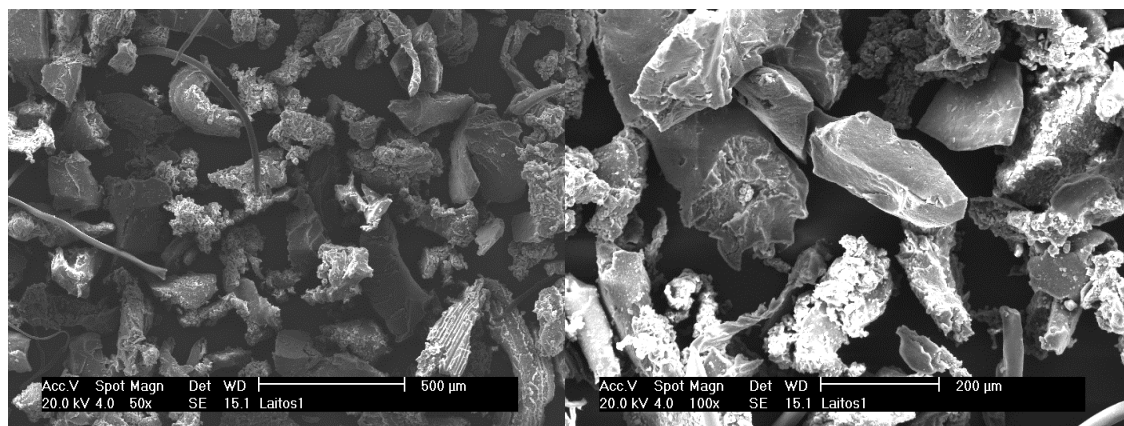
Kuva 42. Metallin (vasemmalla) ja tekstiilin (oikealla) vertailua laitosten 1 ja 2 kesken.

Kumin, metallin ja tekstiilin ohella molemmat laitokset tuottivat jätteenksi lueteltavaa materiaalia, jonka määrä oli kuitenkin muihin tuotteisiin nähden hyvin pieni, alle 1 % koko saannosta. Laitoksessa 1 jäte koostui pääasiassa kivistä ja hiekasta, laitoksessa 2 alle 0,25 mm kumipölystä. Laitoksessa 1 jäte vietiin kaatopaikalle, kun taas laitoksessa 2 jäte hyödynnettiin polttolaitoksessa. Laitoksen 2 eduksi voitiin katsoa, että myös jätteestä saatiin hinta.

4.3 Laboratoriokokeiden tulokset

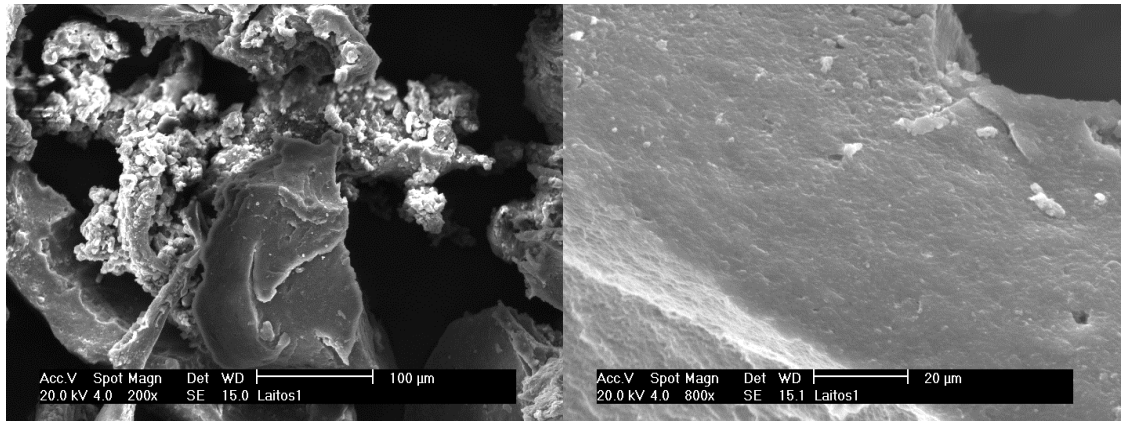
4.3.1 Laitoksessa 1 tuotettujen kumipartikkelien muoto ja pintakuvio

Pyyhkäisyelektronimikroskooppitutkimusten perusteella laitoksessa 1 tuotetut kumipartikkelit olivat muodoltaan pääasiassa pitkänomaisia ja niillä tuntui olevan enemmän tai vähemmän pyöreät muodot (Kuva 43). Poikkeuksiakin tosin löytyi, kuten Kuvassa 43 (oikealla) hyvin suorakaiteen muotoinen partikkeli. Kuvan 43 mukaan laitokselta 1 saatu partikkelijakauma näytti melko epähomogeeniselta. Epäpuhtauksia näkyi jonkin verran näytteen seassa.



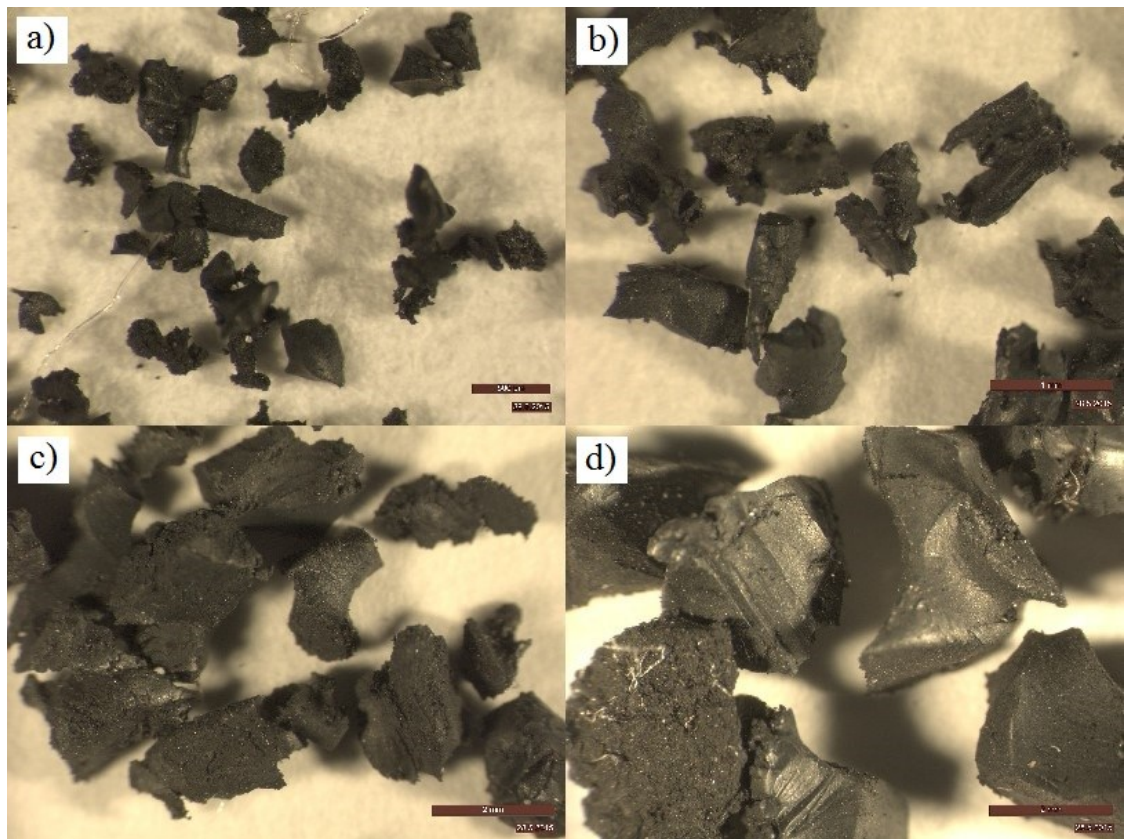
Kuva 43. Pyyhkäisyelektronimikroskoopilla saatua yleiskuvaa laitoksen 1 tuottamista kumipartikkeleista.

Pintakuvio laitoksen 1 partikkeleissa vaihteli melko voimakkaasti sileän ja karheen välillä (Kuva 44). Yleiskuvan (Kuva 43) perusteella suurin osa partikkeleista näytti kuitenkin olevan pinnaltaan röpelöisiä ja huokoisia, jolloin sileähköt partikkelit jäivät selkeästi vähemmistöön.



Kuva 44. Pyyhkäiselektronimikroskoopilla saatua lähikuvaa laitoksen 1 tuottamista kumipartikkeleista.

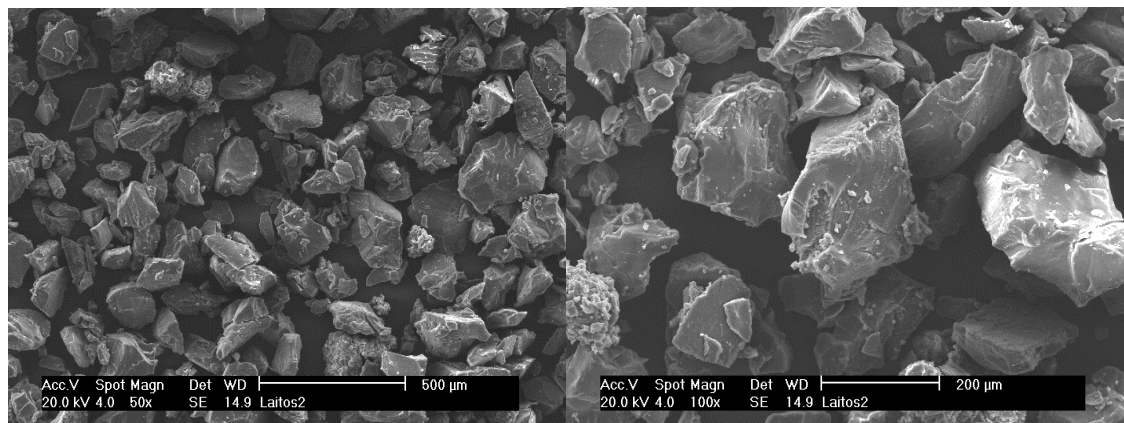
Stereomikroskooppikuvien (Kuva 45) perusteella laitoksessa 1 tuotetut kumipartikkelit olivat muodoltaan useimmiten melko pitkänomaisia. Pintakuvio partikkeleissa vaihteli SEM-kuvien tapaan sileästä jokseenkin karheaan. Yleisilmeeltään partikkelit näyttivät kuitenkin sileämmiltä kuin mitä pyyhkäiselektronimikroskooppitutkimus antoi ymmärtää.



Kuva 45. Stereomikroskooppikuvat laitoksen 1 partikkeleista, jotka ovat halkaisijaltaan a) 250–500 µm, b) 500–1000 µm, c) 1000–2000 µm ja d) 2000–2800 µm.

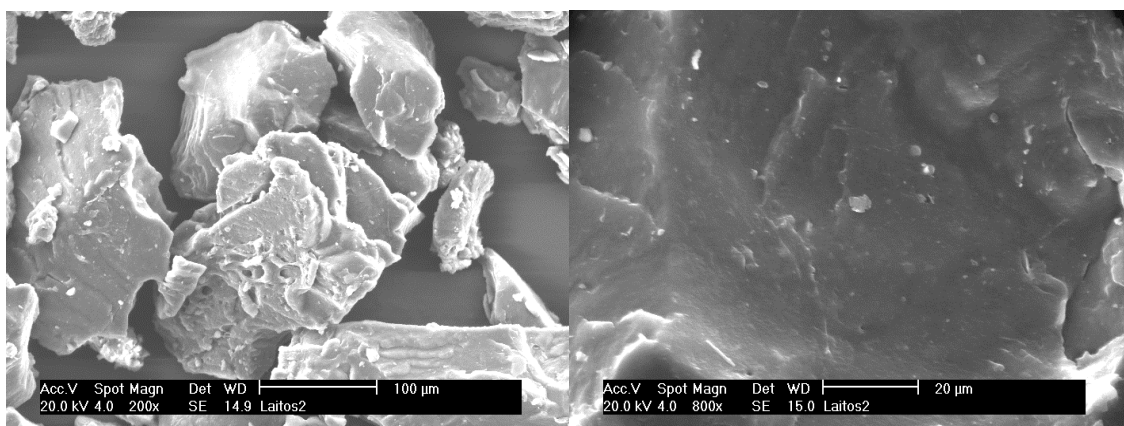
4.3.2 Laitoksessa 2 tuotettujen kumipartikkelien muoto ja pintakuvio

Laitoksessa 2 tuotetut kumipartikkelit olivat pyyhkäisyelektronimikroskooppitarkastelujen perusteella muodoltaan osin pyöreähköjä ja osin kuutiollisia (Kuva 46). Muotonsa ja pintakuvionsa perusteella partikkelit näyttivät suhteellisen tasalaatuisilta eli homogeenisilta. Silmiinpistävää näytettä tarkasteltaessa oli se, että tutkittu materiaali vaikutti erittäin puhtaalta eikä epäpuhtauksia juuri näkynyt kumipartikkelien joukossa.



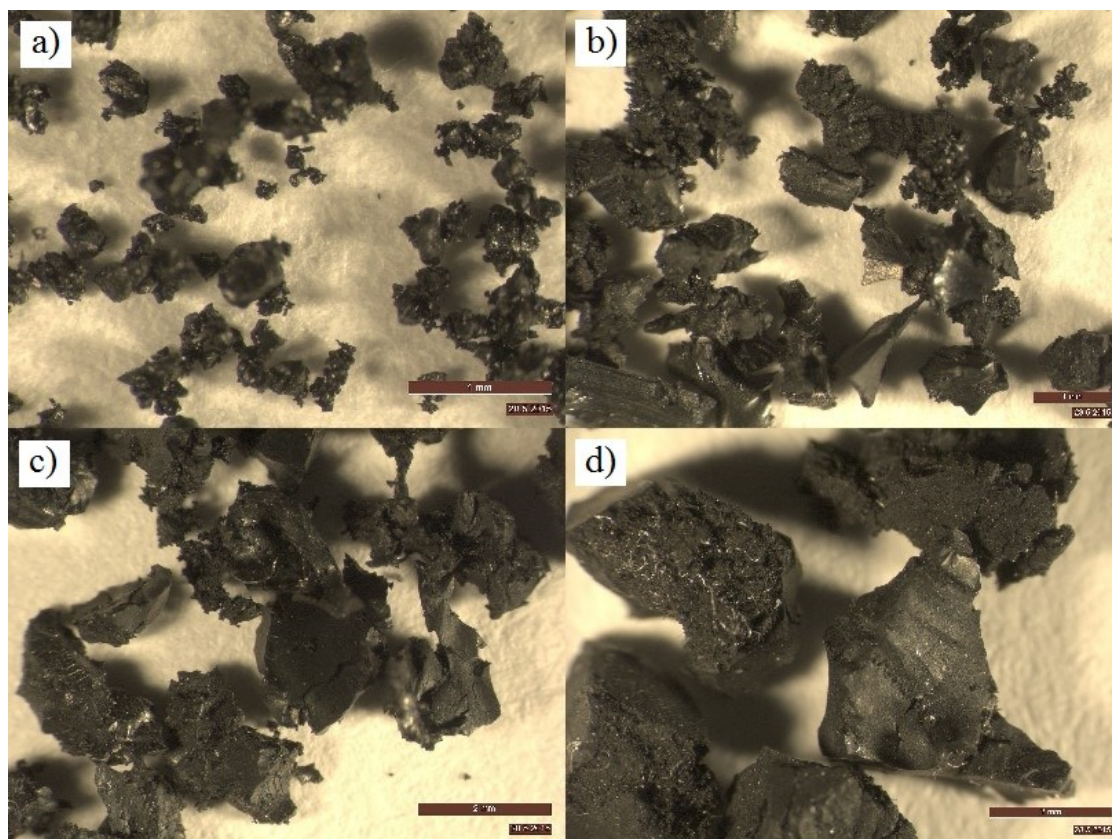
Kuva 46. Pyyhkäisyelektronimikroskoopilla saatua yleiskuvaa laitoksen 2 tuottamista kumipartikkeleista.

Pintakuvio laitoksen 2 partikkeleissa osoittautui SEM-tarkasteluissa pääasiassa melko sileäksi sekä osin särmikkääksi ja suomaiseksi (Kuva 46, Kuva 47). Poikkeuksena näytteestä löytyi myös muutamia hyvin röpelöisiä partikkeleja. Niiden määrä jäi tosin laajaa kokonaisuutta tarkasteltaessa lähes mitättömäksi.



Kuva 47. Pyyhkäisyelektronimikroskoopilla saatua lähikuvaa laitoksen 2 tuottamista kumipartikkeleista.

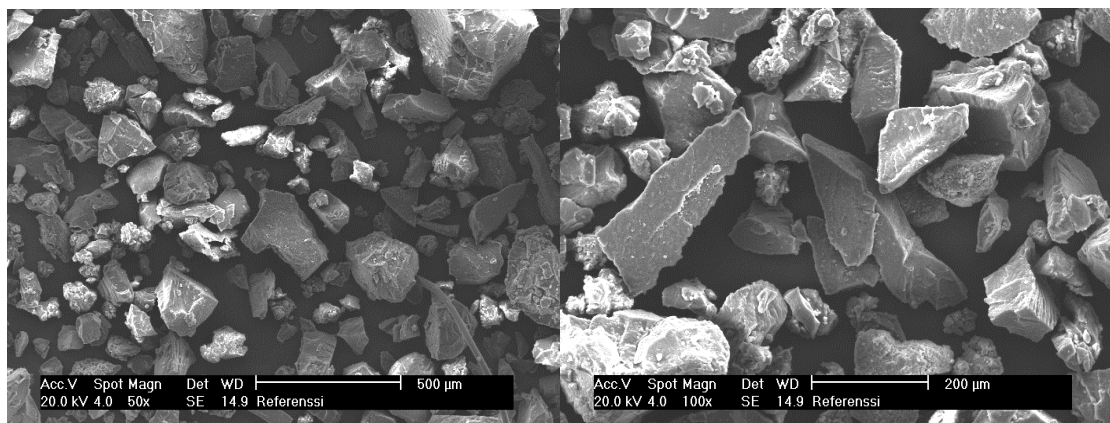
Stereomikroskooppikuvissa (Kuva 48) partikkelit näyttivät suurimmaksi osaksi huomattavasti karheammilta ja moniulotteisemmilta kuin mitä SEM-kuvat antoivat ymmärtää. Stereomikroskooppikuvat vahvistivat partikkelien olevan muodoltaan useimmiten pyöreähköjä.



Kuva 48. Stereomikroskooppikuvat laitoksen 2 partikkeleista, jotka ovat halkaisijaltaan a) 250–500 μm , b) 500–1000 μm , c) 1000–2000 μm ja d) 2000–2800 μm .

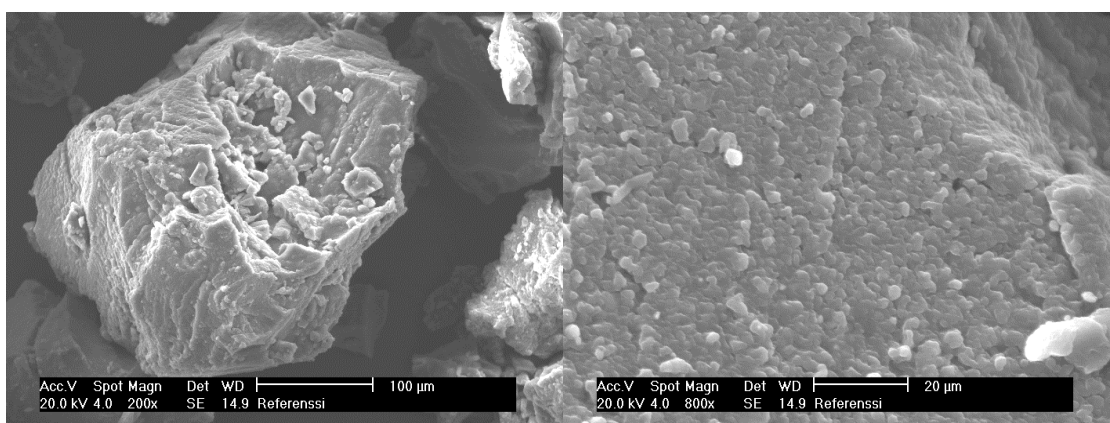
4.3.3 Referenssinäytteen muoto ja pintakuvio

Kryomurskaimesta saadut kumipartikkelit osoittautuivat pyyhkäisyelektronimikroskooppitarkastelujen perusteella muodoltaan varsin epäsäännöllisiksi, mutta pintakuvioltaan suhteellisen homogeenisiksi (Kuva 49). Useimmiten partikkeleilla oli teräviä reunoja tai kulmia, jonka vuoksi niiden muodon voitiin sanoa olevan kuutiollinen. Tosin myös pehmeämpiä ja pyöreämpiä muotoja löytyi paljon.



Kuva 49. Pyyhkäisyelektronimikroskoopilla saatua yleiskuvaa referenssinäytteen kumi-partikkeleista.

Kryomurskaimesta saatujen partikkelien pintakuvio osoittautui SEM-tarkasteluissa yleisilmeeltään sileäksi sekä osin särmikkääksi ja suomuiseksi (Kuva 49, Kuva 50). Tutkittaessa partikkelin pintaa hyvin läheltä, se näytti tasaisen rakeiselta.



Kuva 50. Pyyhkäisyelektronimikroskoopilla saatua lähikuvaa referenssinäytteen kumi-partikkeleista.

4.4 Laboriokokeissa saatujen tulosten tarkastelu

4.4.1 Laitosten 1 ja 2 tuottamien kumi-partikkelien pintaominaisuuksien eroavaisuudet

Laboratoriossa suoritettujen mikroskooppitutkimusten tulokset on koottu Taulukkoon 15. Taulukon 15 tuloksia tarkasteltaessa on huomattava, että saadut tulokset ovat vain suuntaa antavia keskiarvoja, sillä partikkelien muodon ja pintakuvion tulkitseminen ei ollut aivan yksiselitteistä johtuen esimerkiksi eri mikroskoopeilla saaduista hieman toi-

sistaan poikkeavista tuloksista. Tutkitun referenssinäytteen kokoluokka oli myös laajempi kuin laitoksilta 1 ja 2 saatujen näytteiden kokoluokat, mikä saattoi lisätä referenssinäytteen epähomogeenisuutta ja täten vaikeuttaa sen vertailtavuutta.

Taulukko 15. Laboratoriossa tutkittujen näytteiden muoto ja pintakuvio.

Näyte	Muoto	Pintakuvio
Laitos 1	Pitkänomainen, suorakulmio	Karhea, röpelöinen, huokoinen, osin sileähkö
Laitos 2	Pyöreähkö, osin kuutiollinen	Sileä, osin särmikäs, osin suomuinen
Referenssinäyte	Kuutiollinen, pyöreähkö	Sileä, särmikäs, osin suomuinen

Kuten Taulukosta 15 nähdään, SEM-kuvien perusteella laitokselta 2 saatu näyte ja referenssinäyte osoittivat samankaltaisuutta muotonsa ja pintakuvionsa osalta. Eroavaisuuksia oli tosin myös havaittavissa. Esimerkiksi referenssinäytteessä oli hieman enemmän teräviä kulmia ja partikkelien pinta oli kaikkialla suhteellisen sileä. Laitoksesta 2 saadut partikkelit olivat sen sijaan muodoltaan astetta pehmeämpikulmaisia. Partikkelien pinta oli pääasiassa melko sileää, mutta näytteestä löytyi muutamia yksittäisiä hyvin karheita ja röpelöisiä yksilöitä. Referenssinäytteelle tyypillistä rakeista pintaa ei ollut laitoksen 2 partikkeleissa.

Laitoksesta 1 saadut partikkelit erosivat muodoltaan ja pintakuvioltaan huomattavasti laitoksen 2 partikkeleista ja referenssinäytteen partikkeleista. Laitoksella 1 tuotetut kumipartikkelit olivat karheapintaisempia ja täten suuremman ominaispinta-alan omaavia kumipartikkeleita. Laitoksen 1 näytteestä löytyi myös muutamia hyvin sileitä kumipartikkeleita, mikä osoitti, että partikkelien välillä oli suurta vaihtelevuutta.

Kun otetaan huomioon myös stereomikroskoopilla saadut tulokset, edellä esitetty tilanne muuttuu hieman. Stereomikroskooppitutkimusten mukaan nimittäin laitoksen 2 partikkelit osoittivat suurta karheutta, jopa suurempaa karheutta kuin laitoksen 1 partikkelit. Kryomurskaimesta saatuja partikkeleita ei tutkittu stereomikroskoopilla, mutta kirjallisuudesta saatujen tietojen perusteella voitiin vahvasti olettaa niiden näyttävän sileiltä tutkimusmenetelmästä riippumatta. Eri mikroskooppitutkimuksilla saatujen tulosten eroavaisuuksien uskottiin johtuvan tutkittujen näytteiden eri kokoluokista.

4.4.2 Laboratoriokokeissa saatujen tulosten vertailu kirjallisuustietoihin

Kirjallisuuden mukaan laitoksessa 1 olevan granulaattorin pitäisi tuottaa pääasiassa suorakaiteen muotoisia partikkeleita (De et al. 2005, 73). Ero kirjallisuudesta saatujen arvojen ja mikroskooppitulosten välillä näytti olevan siis vain siinä, että suorien kulmien sijaan tutkituilla partikkeleilla tuntui olevan enemmän tai vähemmän pyöreät muodot. Kirjallisuudesta ja mikroskooppitutkimuksista saadut hieman toisistaan eriävät tulokset saattoivat johtua laitoksessa 1 käytetyn granulaattorin terien tylsistymisestä, jolloin niiden leikkaava vaikutus on muuttunut enemmän repiväksi.

Laitokselta 1 saatujen partikkelien pintakuvion tulisi kirjallisuuden mukaan olla vain heikosti karhea (De et al. 2005, 73). Laitokselta 1 saadut stereomikroskooppikuvat vastasivat näitä kirjallisuudesta saatuja tietoja paremmin kuin pyyhkäisyelektronimikroskooppikuvat. Syyksi kahdella eri mikroskoopilla saatujen tulosten eroavaisuuteen epäiltiin pyyhkäisyelektronimikroskoopin laajaa suurennusaluetta ja syvyystarkkuutta, jonka seurauksena jopa melko sileä pinta on mahdollista saada näyttämään joissain tapauksissa karhealta. Voisi olla myös mahdollista, että partikkelien pintakuviot muuttuu partikkelikoon suhteen niin, että suurimmat partikkelit ovat granulaattorin leikkaavien voimien aikaansaamia, kun taas jauhe on syntynyt kumipartikkelien hiertyessä toisiaan vasten, jolloin pinnasta on tullut karheampi. SEM-tulosten hyvin karheat pintakuviot saattavat olla selitettävissä myös samoin kuin partikkelien pehmeät muodot eli granulaattorin terien kuluneisuudella. Lisäksi granulaattorissa on voinut tapahtua lämpötilan nousua, joka on synnyttänyt termistä hajoamista. Lämpötilan nousun seurauksena tahmeiden kumipartikkelien pintaan on saattanut tarttua hyvin hienojakoista kumipölyä.

Laitoksen 2 osalta kirjallisuudesta ei löytynyt tutkittua tietoa siitä, minkä muotoisia juuri kollarimurskaimella tuotettujen partikkelien pitäisi olla, ja täten tarkkaa vertailua mikroskooppitulosten ja kirjallisuudesta saatujen arvojen välillä ei voitu suorittaa. Kollarimurskain perustuu kuitenkin ambienttiseen repivään menetelmään, jonka perusteella partikkelien reunojen ja kulmien tulisi olla pyöreähköjä (Thodesen et al. 2009, 297–299). Tämä vastaa pääsääntöisesti sekä pyyhkäisyelektroni- että stereomikroskoopilla tehtyjä havaintoja.

Kirjallisuuden mukaan laitoksella 2 käytetyn kollarimurskaimen pitäisi tuottaa pintakuvioltaan karheita partikkeleita, joilla on suhteellisen suuri ominaispinta-ala (Amandus Kahl GmbH & Co. KG_a, Santagata et al. 2009, 2). Laitoksen 2 stereomikroskooppikuvat puolsivat pyyhkäisyelektronimikroskooppikuvia paremmin kirjallisuudesta saatuja tietoja. Selkeitä syitä stereo- ja pyyhkäisyelektronimikroskooppikuvilla saatujen tulosten eroavaisuudelle tai kirjallisuudesta löydettyjen tietojen poikkeavuudelle ei osattu selittää, mutta tutkittujen partikkelien erilaisilla kokoluokilla oletettiin olevan vaikutusta tulokseen.

Kryomurskaimella tuotettujen partikkelien muodon pitäisi kirjallisuuden mukaan olla kuutiollinen, koska kryomurskaimessa kumi hajoaa lasin tavoin muodoltaan hyvin erilaisiksi sirpaleiksi, joilla on terävät kulmat ja reunat (De et al. 2005, 73, 180; Santagata et al. 2009, 2, 11, 18). SEM-tutkimuksissa tehdyt havainnot vastasivat pitkälti näitä kirjallisuudesta löydettyjä tietoja, sillä näytteessä oli havaittavissa useita ”lasinsirumaisia” partikkeleita. Pyöreämpiäkin muotoja tosin löytyi.

Kirjallisuudesta löydettyjen tietojen mukaan kryomurskaimesta saatujen partikkelien pinnan pitäisi olla sileä synnyttäen näin suhteellisen pienen ominaispinta-alan (De et al. 2005, 78). Kirjallisuudessa kuitenkin painotetaan sitä, että kryomurskaimella on yleisesti mahdollista tuottaa pienempiä partikkeleita kuin ambienttisilla murskausmenetelmillä, jolloin kryomurskaimesta saatujen partikkelien ominaispinta-ala kasvaa (m^2/g) (Santagata et al. 2009, 18). Kumin murtumismekanismista johtuen partikkeleille muodostuu myös kiderakenne (Thodesen et al. 2009, 297–299), aivan kuten pyyhkäisyelektronimikroskooppitutkimukset osoittivat.

4.4.3 Pintaominaisuuksien merkitys kumipartikkelien hyödynnettävyyden kannalta

Kumipartikkelien pintaominaisuudet vaikuttavat niiden mahdollisiin hyötykäyttösoveluksiin. Sileän pinnan omaavat partikkelit soveltuvat kirjallisuuden mukaan hyvin sideaineen, kuten uretaanin, kanssa käytettäväksi, sillä rajoittunut ominaispinta-ala vähentää sideaineen käyttötarvetta. Sileäpintaista partikkeleista koostuva jauhe on myös vapaasti juoksevaa, jonka vuoksi jauhe mm. levittyy helposti ja sen syöttäminen eri prosesseihin on tarkkaa. Esimerkkeinä sileäpintaisten kumipartikkeleille soveltuvista käyttökoh-

teista mainittakoon erilaiset leikki- ja urheilukenttien päällysteet. (De et al. 2005, 72–73, 78; Talja 2015; United States Environmental Protection Agency 2010, 24.)

Suuren ominaispinta-alan omaavilla karheapintaisilla kumipartikkeleilla on kirjallisuuden mukaan sileäpintaisia partikkeleita laajempi tarttumapinta-ala ja nopeampi reaktio-aika, minkä takia ne sopivat erityisesti sovelluksiin, joissa partikkelin tiukka kiinnittyminen neitseellisen kumin tai muiden aineiden kanssa on tärkeää. Tällaisia sovelluksia ovat esimerkiksi paineen ja lämpötilan avulla valetut tuotteet ja sekä asfaltti. On kuitenkin hyvä pitää mielessä, että edellä esitetyissä sovelluksissa pintakuvion ohella partikkelien koko on tärkeässä asemassa, sillä pienempiä partikkeleita voidaan kokemuksen mukaan lisätä enemmän haluttuun seokseen ilman, että tietyistä tärkeistä mekaanisista ominaisuuksista joudutaan luopumaan. Lisäksi pienempien partikkelien avulla on mahdollista saavuttaa tasaisempi ja paremman näköinen pinta kuin isompia partikkeleita käytettäessä. (De et al. 2005, 72–73, 80, 180–181.)

Kumipartikkelien muotoon perustuvia etuja ja haittoja ei kirjallisuudesta juuri löytynyt. Partikkelien muotoa tarkasteltaessa voisi kuitenkin olettaa, että soikean muotoiset partikkelit sopivat pyöreitä paremmin sovelluksiin, joissa esimerkiksi vedenläpäisevyys on tärkeässä asemassa, sillä soikeita partikkeleita päällekkäin kasaamalla ilmaa jää enemmän partikkelien väliin kuin mitä pyöreiden partikkelien kanssa jäisi. Jos taas halutaan tehdä hyvin tiivis kumikerros, silloin todennäköisesti pyöreät partikkelit tulisivat edullisemmaksi. Tekonurmikenttien pinnalle levitettävä kumigranulaatti voisi olla esimerkki käyttökohteesta, jossa soikeiden kumipartikkelien käyttö olisi parempi ratkaisu kuin pyöreiden partikkelien käyttö.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

5.1 Renkaiden hienontaminen ja kumin devulkanointi osana niiden kierrätystoimintaa

Kirjallisuuskatsauksen tarkoituksena oli tutkia kierrätysrenkaiden hienontamismenetelmiä sekä rengaskumin devulkanointia osana materiaalin jatkokäsittelyä. Devulkanoinnissa mielenkiinto kohdistettiin sovelluksen vaatimaan kumipartikkelin maksimaaliseen palakokoon, sillä prosessiin syötettävää palakokoa suurentamalla devulkanointia edeltäviä prosessivaiheita voitaisiin mahdollisesti vähentää ja täten tuotantokustannuksia minimoida.

Kirjallisuuskatsauksen perusteella käytöstä poistettujen renkaiden hienontaminen halkaisijaltaan alle 1 mm kumijauheeksi saavutetaan yleensä kolmiportaisesti primääri-, sekundääri- ja tertiääriprosessoinnissa. Kussakin prosessointivaiheessa on mahdollista käyttää useita erilaisia murskausmenetelmiä, joista jokaisella on omat vahvuutensa ja heikkoutensa. Koska murskaustoiminnan kustannuksista suurin osa syntyy laitteiden energiankulutuksesta, on kuhunkin prosessointivaiheeseen kuuluvia murskaimia kannattavaa tarkastella keskenään niiden energiankulutusten perusteella. Pelkästään energiankulutustietoihin pohjautuen tässä työssä tarkastelluista laitteista leikkaava murskain olisi paras primääriprosessointilaitte ja granulaattori tai kollarimurskain paras sekundääriprosessointilaitte. Tertiääriprosessointilaitteista puolestaan valssimurskaimen katsotaan olevan yleisesti kustannustehokkain. Sillä on kuitenkin omat rajoitteensa hyvin pientä kumijauhetta valmistettaessa. Tämän vuoksi kryomurskainta pidetään potentiaalisena vaihtoehtona erittäin hienojakoisen kumijauheen valmistamiseksi siitäkin huolimatta, että sen käyttö vaatii huomattavan määrän nestemäistä tyypeä.

Renkaista hienonnetut kumipartikkelit on mahdollista jatkokäsitellä devulkanoinnin avulla. Devulkanoitavan kumipartikkelin maksimikokona pidetään yleisesti noin 2,0 mm, joka tarkoittaa, että tertiääriprosessoinnissa tuotetun kumijauheen lisäksi sekundääriprosessoinnissa tuotetut pienimmät kumigranulaatit soveltuvat devulkanointiin. Sekundääriprosessoinnissa tuotettujen kumipartikkelien käyttö devulkanoinnissa olisi järkevää, koska täten yksi hienontamisvaihe voitaisiin jättää pois. Suurin osa devulkanointiprosesseista kuitenkin tapahtuu partikkelin pinnalla, jolloin devulkanoinnin onnistu-

neisuus on suoraan verrannollinen kumin partikkelikokoon. Jos siis kokoluokan 2,0 mm partikkeleita haluttaisiin devulkanoida, tulisi devulkanointireaktion läpäistä partikkeli.

Tällä hetkellä maailmassa on kaksi kumipartikkelin läpäisevää devulkanointimenetelmää: mikroaaltoihin perustuva devulkanointi ja ultraääniaaltoihin perustuva devulkanointi. Näistä tosin kumpikaan ei ole ainakaan tällä hetkellä sopiva rengaskumin devulkanointiin, koska i) rengaskumi ei ole tarpeeksi poolinen mikroaaltodevulkanoinnille, ja ii) ultraääniaaltodevulkanoinnin vaatimat ultraääniyksiköt eivät ole vielä tarpeeksi tehokkaita. Jos ultraääniyksiköt kehittyvät tulevaisuudessa huomattavasti tehokkaammiksi, on ultraääniaaltodevulkanointi todella vartenotettava devulkanointimenetelmä rengaskumille.

5.2 Murskauslaitosten laite- ja prosessierot

Työn kokeellisen osuuden ensimmäisessä osassa vertailtiin kahta renkaiden murskauslaitosta niiden prosessi- ja tuoteominaisuuksien osalta. Vertailussa pääpaino oli laitoksilla käytettyjen murskainten määrässä, huoltotarpeessa ja energiankulutuksessa sekä prosessin seurauksena saatujen lopputuotteiden määrässä ja laadussa. Vertailu pohjautui laitosvierailuilla kerättyihin tietoihin.

Laitosvierailujen yhtenä tärkeimpänä johtopäätöksenä voitiin tehdä se, että laitoksessa 1 murskausprosessi oli useampivaiheinen kuin laitoksessa 2. Tämä lisäsi laitoksessa 1 olevien murskainten määrää, mikä puolestaan kasvatti sekä investointi- että käyttökustannuksia. Primääriprosessointilaitteena molemmilla laitoksilla oli leikkaava murskain. Sekundääriprosessointilaitteena laitoksella 1 käytettiin kahta sarjassa olevaa granulaattoria, laitoksessa 2 kollarimurskainta. Kollarimurskaimen etuna oli alhaisempi huoltotarve. Energiankulutus käsiteltyä kumitonnia kohden laitoksella 1 oli 2,1-kertainen laitoksen 2 energiankulutukseen verrattuna. Lopputuotteidensa määrän osalta laitokset eivät juuri poikenneet toisistaan. Laadullisia eroavaisuuksia sen sijaan oli havaittavissa, mutta ainakaan tuotteiden hyötykäyttökohteisiin nämä eivät tuntuneet vaikuttavan.

Tarkasteltaessa laitosten 1 ja 2 prosessien käyttöönottomahdollisuuksia toisessa kierrätysalan yrityksessä, laitos 2 osoitti olevan käyttökustannuksiltaan parempi, sillä sen energiankulutus oli huomattavasti pienempi ja huoltotarve vähäisempi kuin laitoksessa 1. Toisaalta laitos 2 tuntui haavoittuvaisemmalta, koska se perustui yhteen linjastoon,

jonka seurauksena vika yhdessä murskaimessa voisi pysäyttää koko tuotannon. Laitosvierailujen kohteena ollut laitos 2 oli käsittelykapasiteetiltaan paljon pienempi kuin laitos 1. Jos laitoksen 2 kapasiteetti nostettaisiin samalle tasolle laitoksen 1 kanssa, tulisi sillekin useampia rinnakkaisia linjoja. Näin ollen haavoittuvaisuuden ongelma poistuisi, samalla kun sen etuudet laitokseen 1 nähden säilyisivät.

5.3 Murskauslaitoksilla tuotettujen kumipartikkelien eroavaisuudet

Työn kokeellisen osuuden toisessa osassa vertailtiin kahta renkaiden murskauslaitosta niissä tuotettujen kumipartikkelien muodon ja pintakuvion perusteella. Vertailu pohjautui pyyhkäisyelektronimikroskoopilla ja stereomikroskoopilla suoritettuihin laboratorio-tutkimuksiin.

Mikroskooppitarkasteluissa havaittiin, että laitoksilla 1 ja 2 tuotetut kumipartikkelit erosivat pintaominaisuuksiensa perusteella selvästi toisistaan. Laitoksen 1 partikkelit osoittautuivat suurimmaksi osaksi muodoltaan pitkänomaisiksi. Laitoksen 2 partikkelit olivat puolestaan muodoltaan selkeästi enemmän pyöreitä. Molemmilta laitoksilta saatujen partikkelien pinnankarheus vaihteli, mutta oli pyyhkäisyelektronimikroskooppikuvien perusteella laitoksessa 1 pääasiassa karhea ja laitoksessa 2 pääasiassa sileä, vaikkakin särmikäs. Mikroskooppitutkimuksissa oli mukana myös kolmannelta osapuolelta peräisin oleva ns. referenssinäyte, joka koostui eräällä kryomurskaimella tuotetuista kumipartikkeleista. Referenssinäytteen partikkelit vastasivat riittävällä tarkkuudella laitoksen 2 partikkeleita: referenssinäytteen partikkelit olivat muodoltaan kuutiollisia tai pyöreähköjä sekä pintaominaisuuksiltaan sileitä ja särmikkäitä. Kirjallisuuden mukaan pienen ominaispinta-alan omaavat sileäpintaiset partikkelit sopisivat sideaineen kanssa käytettäväksi, kun taas suuren ominaispinta-alan omaavat karheapintaiset partikkelit sopisivat muihin seoksiin.

Laboratoriokokeiden seurauksena saadut partikkelien muotoa koskevat tulokset vastasivat melko hyvin kirjallisuudesta löydettyjä aiempia tietoja. Sen sijaan pintaominaisuuksia koskevat tulokset olivat jokseenkin yllättäviä, sillä esimerkiksi laitoksesta 1 saatujen partikkelien olisi pitänyt olla hieman sileämpiä, johtuen käytetyn granulaattorin leikkaavasta murskausmenetelmästä. Sen sijaan laitoksessa 2 murskaus perustui repivään menetelmään, jolloin tuotettujen partikkelien olisi teoreettisesti tarkasteltuna kuulunut

olla röpelöisempiä. Stereomikroskooppitutkimuksissa saadut kuvat vastasivat paremmin kirjallisuuden pohjalta oletettuja tuloksia.

Tieto siitä, että laitoksella 2 käytetyn kollarimurskaimen avulla voitaisiin tuottaa kumipartikkeleita, joiden ominaisuudet ovat hyvin lähellä kryomurskaimesta saatujen partikkelien ominaisuuksia, on mielenkiintoinen, sillä käyttökustannuksiltaan kollarimurskain on varmasti halvempi vaihtoehto kuin kalliina pidetty kryomurskain. Täten renkaiden kierrätysalalla oleva yritys saattaisi haluta ottaa laitoksen 2 murskaustavan käyttöönsä, mikäli yrityksen intressinä on tuottaa kryomurskatun kumin kaltaisia partikkeleita. On kuitenkin muistettava, että kollarimurskaimella ei ole mahdollista päästä tuottamaan yhtä paljon yhtä pieniä kumipartikkeleita kuin kryomurskaimella pystytään tuottamaan. Tästä huolimatta tämän työn mikroskooppituloksia ja mahdollisia uusintakokeiden tuloksia voidaan pitää kansainvälisesti kiinnostavina.

5.4 Työn toteutumisen tarkastelu ja jatkotutkimuksen tarpeet

Diplomityön avulla saadut johtopäätökset täyttivät suurimmaksi osaksi työn alussa määritellyt tutkimustavoitteet, sillä tutkimuskysymyksiin onnistuttiin vastaamaan pääasiassa melko perinpohjaisesti. Murskauslaitoksia koskevissa tiedoissa havaittiin joitain puutteita, jotka hankaloittivat laitosten vertailtavuutta. Puutteet koskivat erityisesti laitosten energiankulutustietoja sekä tuotettujen kumifraktioiden määrällistä jakautumista ja hinnoittelua. Puutteet johtuivat pitkälti laitosten halusta pitää tietyt prosessin toimintaa kuvaavat tiedot omina tietoinaan. Laitoksissa käytettyjen murskainten tarkemman vertailun mahdollistamiseksi laitosvierailujen suunnittelussa olisi pitänyt huomioida myös paremmin mm. erot kokonaiskapasiteetissa sekä primääriprosessointilaitteelta saadun rengasmurskeen palakoossa.

Renkaista hienonnetun kumijauheen ominaisuuksien sekä sen olemassa olevien ja uusin hyötykäyttökohteiden jatkotutkiminen ja etsiminen olisi tarpeen käytöstä poistettujen renkaiden kierrätettävyyden tehostamisen takaamiseksi, sillä kuten diplomityössä tuli ilmi, ei kumijauheen markkinapotentiaalia ole vielä täysin onnistuttu selvittämään. Tämänkaltaista tutkimusta olisi ensisijaisen tärkeää laajentaa välittömästi, sillä toimivien hyötykäyttökohteiden olemassaolo on perusta koko renkaiden kierrätystoiminnan onnistumiselle.

Devulkanointia koskevassa jatkotutkimuksessa olisi mielenkiintoista selvittää, kuinka paljon parempi kumipartikkelin devulkanoitumisaste ultraääniäaltodevulkanoinnilla voitaisiin saavuttaa verrattuna devulkanointimenetelmään, jossa devulkanointireaktio tapahtuu vain partikkelin pinnalla. Onko ero merkittävä? Kuinka tämä ero muuttuu käsiteltävien kumipartikkelien palakokoa muuttamalla? Lisäksi erityisesti Kuusakosken tietotarpeita ajatellen valvotuissa olosuhteissa suoritettut murskauskokeet yksittäisten murskauslaitteiden vertailemiseksi voisivat olla hyödyllisiä. Näin myös eri laitteiden energiankulutustietoja voitaisiin täsmentää.

Kollarimurskaimella ja kryomurskaimella saatujen partikkelien yhtäläisyyden vahvistamiseksi mikroskooppitutkimus olisi hyvä uusien useamman näytteen ja runsaamman kuvasadon avulla. Uusintakokeissa tulosten luotettavuutta voitaisiin parantaa näytteiden kokoluokkia kaventamalla ja kaikilta osin yhteneviä kokoluokkia käyttämällä. Uusintakokeissa näytteenoton kriittinen arviointi on tärkeää mahdollisimman edustavan näytteen aikaansaamiseksi. Näytteille voitaisiin suorittaa myös muita kokeita, kuten tiivistyskokeita, partikkelien eroavaisuuksien tunnistamiseksi.

6 YHTEENVETO

Johtuen renkaiden monimutkaisesta rakenteesta niiden kierrätettävyyden tehostaminen vaatii hienontamistoimia, joissa kokonaiset renkaat murskataan pienempään partikkeli-kokoon. Tällöin renkaiden sisältämä kumi saadaan talteen ja se voidaan hyödyntää joko sellaisenaan tai jatkokäsiteltynä uusissa korkeatasoisissa sovelluksissa. Eräs jatkokäsittelymenetelmä on devulkanointi, jossa kumi pyritään palauttamaan takaisin neitseellisen kumin kaltaiseksi. Palauttamalla kumi alkuperäiseen muotoonsa esimerkiksi tiettyjä kumin mekaanisia ominaisuuksia ei menetetä.

Tämän diplomityön tavoitteena oli koota yhteen ja vertailla kierrätysrenkaan hienontamiseksi olemassa olevia menetelmiä sekä tutkia devulkanoinnin soveltuvuutta rengaskumipartikkelien jatkokäsittelymenetelmänä. Devulkanoinnin osalta oltiin erityisen kiinnostuneita menetelmään soveltuvan kumipartikkelin maksimaalisesta palakoosta, sillä ajateltiin, että prosessiin syötettävää palakokoa suurentamalla devulkanointia edeltäviä prosessivaiheita voidaan mahdollisesti vähentää ja täten tuotantokustannuksia minimoida. Kokeellisessa osuudessa vertailtiin kahta kumigranulaattia tuottavaa murskauslaitosta niiden prosessi- ja tuoteominaisuuksien osalta. Prosessin toimintaa kuvaavista tekijöistä vertailujen kohteena olivat erityisesti käytettyjen murskainten määrä, huoltotarve ja energiankulutus sekä prosessin seurauksena saatujen lopputuotteiden määrä ja laatu. Tuotettujen kumipartikkelien osalta mielenkiinnon kohteena oli puolestaan niiden muoto ja pinnankarheus, koska näiden tekijöiden katsottiin vaikuttavan oleellisesti kumipartikkelien hyötykäyttömahdollisuuksiin.

Työn tutkimusaineisto koottiin kirjallisuuden, laitosvierailujen ja laboratoriokokeiden avulla. Olemassa olevien murskaus- ja devulkanointimenetelmien koonti pohjautui kirjallisuudesta löydettyihin tietoihin. Kokeellisen osuuden kahta laitosta (laitokset 1 ja 2) vertaileva prosessi- ja tuoteominaisuuksien tarkastelu perustui laitosvierailuihin ja laboratoriossa suoritettuihin mikroskooppitutkimuksiin. Mikroskooppitutkimuksissa käytettiin korkeatasoista pyyhkäisyelektronimikroskooppia ja stereomikroskooppia.

Kirjallisuuskatsauksen perusteella kokonaisten renkaiden hienontaminen kumijauheeksi tapahtuu yleensä kolmiportaisesti primääri-, sekundääri- ja tertiääriprosessointivaiheissa. Kussakin hienontamisvaiheessa on olemassa useita teknisesti erilaisia murskausmenetelmiä, joista jokaisella on omat vahvuutensa. Devulkanoitavan kumipartikke-

lin maksimikokona pidetään yleisesti noin 2,0 mm. Jos tämän kokoisen partikkelin devulkanoitumisaste halutaan kuitenkin pitää korkeana, täytyy devulkanointireaktion läpäästä partikkeli. Kumipartikkelin läpäiseviä devulkanointimenetelmiä on olemassa vain muutama, joista potentiaalisin on ultraääniaaltoihin perustuva devulkanointi. Ultraääniaaltoihin perustuvan devulkanoinnin heikkoutena on tosin se, että se ei ole kehittynyt vielä rengaskierrätyksen teolliseen mittakaavaan soveltuvaksi.

Kokeellisen osuuden perusteella laitokset 1 ja 2 erosivat toisistaan mm. murskaintyyppien ja prosessiominaisuuksien osalta. Tuotteet sen sijaan vastasivat riittävällä tarkkuudella toisiaan. Mikroskooppitutkimusten tuloksena laitoksen 1 ja 2 kumipartikkeleissa oli silmämääräisesti havaittavissa muoto- ja pintakuviollisia eroja: laitos 1 tuotti pääasiassa karheita ja pitkänomaisia kumipartikkeleita, kun taas laitos 2 tuotti sileitä ja pyöreäköjiä mutta särmikkäitä kumipartikkeleita. Mielenkiintoista tuloksissa oli se, että laitoksen 2 kumipartikkelit voitiin muodoltaan ja karheudeltaan tulkita hyvin samankaltaisiksi kuin kolmannelta osapuolelta saadut kryomurskaimella tuotetut kumipartikkelit. Tulosten vahvistamiseksi suositellaan kuitenkin uusintakokeiden suorittamista.

Diplomityön tulokset tulevat edesauttamaan renkaiden murskauksen ja kierrätystoiminnan suunnittelua yrityksessä. Työtä olisi käytännön sovelluksia varten vielä hyvä täydentää mm. uusituilla pyyhkäisyelektronimikroskooppitutkimuksilla ja kumipartikkelien tiivistettävyysskokeilla, tai muilla vastaavilla. Myös kumipartikkelien hyötykäyttökohteiden etsimistä ja tutkimista tulisi laajentaa entisestään.

Lähdeluettelo

Aga. 2015. Turvallisuusohje, Typpi N₂. [Verkkodokumentti]. 1 s. [Viitattu 10.3.2015]. Saatavissa:

http://www.aga.fi/internet.lg.lg.fin/fi/images/AGA%20Nitrogen%20Safety%20Instruction%20FI634_120504.pdf.

Amandus Kahl GmbH & Co. KG_a. New recycling methods for old tyres. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 25.3.2015]. Saatavissa:

http://www.akahl.de/akahl/en/press/press_information/WasteTyreRecycling/.

Amandus Kahl GmbH & Co. KG_b. 2014. Recycling plants for waste tyres. [Verkkodokumentti]. 4 s. [Viitattu 25.3.2015]. Saatavissa:

http://www.akahl.de/akahl/files/Prospekte/Prospekte_englisch/AK36-Altreifen-12e.pdf.

Armillas, C. 2001. Shredder selection. Solid Waste & Recycling. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 26.3.2015]. Saatavissa:

<http://www.solidwastemag.com/features/shredder-selection/>.

Asphalt Rubber Technology Service. 2002. Wet grind tire processing system. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 9.2.2015]. Saatavissa:

<http://www.clemson.edu/ces/arts/wetgrind.html>.

Bredberg, K., Christiansson, M., Stenberg, B. & Holst, O. 2005. Biotechnological processes for recycling of rubber products. [Verkkodokumentti]. S. 362–373. [Viitattu 3.3.2015]. Saatavissa: http://www.wiley-vch.de/books/biopoly/pdf/v02_kap11.pdf.

Buzuluk a.s. Rubber recycling mills (crackers). [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 26.3.2015]. Saatavissa:

<http://www.buzuluk.com/rubber-machinery-division/production-program/other-machines/cracker-mills>.

CalRecovery, Inc. 2004. Evaluation of waste tire devulcanization technologies. [Verkkodokumentti]. 93 s. [Viitattu 10.3.2015]. Saatavissa:

<http://www.calrecycle.ca.gov/Publications/Documents/Tires%5C62204008.pdf>.

ChemRisk LLC. 2009. Tyre generic exposure scenario end of life tyre guidance. [Verkkodokumentti]. 57 s. [Viitattu 28.4.2015]. Saatavissa:

<http://www.etrma.org/uploads/Modules/Documentsmanager/chemrisk--09-12-16-end-of-life-tyre.pdf>.

Christiansson, M., Stenberg, B., Wallenberg, L., R. & Holst, O. 1998. Reduction of surface sulphur upon microbial devulcanization of rubber materials. *Biotechnology letters*. [Verkkolehti]. Vol. 20:7. S. 637–642. [Viitattu 6.1.2015]. Saatavissa: <http://link.springer.com/article/10.1023/A%3A1005306220566>. ISSN 0141-5492 (painettu) ISSN 1573-6776 (sähköinen).

Ciesielski, A. 1999. *An introduction to rubber technology*. Shawbury, United Kingdom: Rapra Technology Limited. 174 s. ISBN 1-85957-150-6.

CWC. 1996. *Best practices in scrap tires & rubber recycling: waste water handling (wet grind)*. [Verkkodokumentti]. 2 s. [Viitattu 10.3.2015]. Saatavissa: <http://infohouse.p2ric.org/ref/13/12516.pdf>.

De, S. K., Isayev, A. I. & Khait, K. 2005. *Rubber recycling*. Boca Raton, USA: Taylor & Francis Group. 514 s. ISBN 0-8493-1527-1.

Desitech Group. 2015. *Competence in ultra fine rubber powder and applications*. 12 s.

DirectIndustry. Hammer mills. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 25.3.2015]. Saatavissa: <http://www.directindustry.com/industrial-manufacturer/hammer-mill-80832.html>.

Eldan Recycling_a. 2014. From 450 pieces of tyre to 2 tons of 99,9 % pure rubber in 1 hour. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 16.2.2015]. Saatavissa: <http://www.eldan-recycling.com/content/450-pieces-tyre-2-tons-%E2%80%A8999-pure-rubber-1-hour>.

Eldan Recycling_b. 2014. Eldan cracker mill. [Verkkodokumentti]. 2 s. [Viitattu 25.3.2015]. Saatavissa: http://www.eldan-recycling.com/sites/default/files/Cracker_Mill_EN_1311_low_0.pdf.

Eldan Recycling_c. 2014. Eldan fine granulator. [Verkkodokumentti]. 2 s. [Viitattu 25.3.2015]. Saatavissa: http://www.eldan-recycling.com/sites/default/files/pdf/Fine%20Granulator_EN_1411_low.pdf.

Energiateollisuus ry_a. Muut ilmanpäästöt. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 31.3.2015]. Saatavissa: <http://energia.fi/energia-ja-ymparisto/ymparisto-ja-kestava-kehitys/ymparistovaikutukset/muut-ilmanpaastot>.

Energiateollisuus ry_b. Happamoituminen. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 31.3.2015]. Saatavissa: <http://energia.fi/energia-ja-ymparisto/ymparisto-ja-kestava-kehitys/ymparistovaikutukset/happamoituminen>.

Energiatallisuus ry_c. SF6-kaasu sähkön siirrossa ja jakelussa. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 31.3.2015]. Saatavissa:

<http://energia.fi/energia-ja-ymparisto/ymparisto-ja-kestava-kehitys/ymparistovaikutukset/sf6-kaasu>.

Erman, B., Mark, J. E., Roland, M. C. 2013. Science and technology of rubber. 4th ed. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Academic Press. 840 s. ISBN 978-0-12-394584-6 (painettu) ISBN 978-0-12-394832-8 (sähköinen).

European Tyre Recycling Association. 2013. Introduction to tyre recycling: 2013. [Verkkodokumentti]. 20 s. [Viitattu 23.2.2015]. Saatavissa:

<http://www.etra-eu.org/joomla/libraries/articles/ETRA%20Introduction001.pdf>.

FEI. 2010. An introduction to electron microscopy. [Verkkodokumentti]. 40 s. [Viitattu 11.5.2015]. Saatavissa:

<http://www.fei.com/documents/introduction-to-microscopy-document/>. Linkki Download now. ISBN 978-0-578-06276-1.

FERCELL. U2100 Granulator Series. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 25.3.2015]. Saatavissa: <http://www.bomaticuk.com/granulator/u2100/>.

Goodyear. 2012. Seos. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 1.12.2014]. Saatavissa:

http://www.goodyear.eu/fi_fi/all-about-tires/understand-your-tire/how-tires-are-made/index.jsp#blend.

Granutech-Saturn Systems. Industrial grinders & rubber granulators. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 27.4.2015]. Saatavissa:

<http://www.granutech.com/saturn-grinders-and-granulators.html>.

Hu, Y, Kang, Y, Wang, X; Li, X, Long, X, Zhai, G & Huang, M. 2014. Mechanism and experimental investigation of ultra high pressure water jet on rubber cutting. International journal of precision engineering and manufacturing. [Verkkolehti]. Vol. 15:9. S. 1973–1978. [Viitattu 9.2.2015]. Saatavissa:

<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12541-014-0553-0>. ISSN 2234-7593 (painettu) ISSN 2005-4602 (sähköinen).

HungaroJet Ltd. Technology. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 30.3.2015]. Saatavissa:

http://www.hungarojet.hu/en/?page_id=11.

Höök, T. 2014. Polymeerimateriaalit. [Verkkodokumentti]. 30 s. [Viitattu 10.2.2015]. Saatavissa: http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/mould_injmoulding_materials_FI.pdf.

Kuusakoski Oy. 2014. Rengaskierrätysseminaari 6.-7.11.2014.

L 17.6.2011/646. Jätelaki.

Laurila, T. 2007. Kumitekniikka, Lyhyt johdatus kumitekniikan perusteisiin. Helsinki, Suomi: Opetushallitus. 207 s. ISBN 978-952-13-3445-0

Levgum. De-vulcanized rubber compound -DRC capabilities. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 2.8.2015]. Saatavissa: <http://levgum.com/index.php/capabilities>

Li, Y., Zhao, S. & Wang, Y. 2012. Improvement of the properties of natural rubber/ground tire rubber composites through biological desulfurization of GTR. Journal of polymer research. [Verkkolehti]. Vol. 19:5. S. 1–7. [Viitattu 6.1.2015]. Saatavissa: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10965-012-9864-y>. ISSN 1022-9760 (painettu) ISSN 1572-8935 (sähköinen).

Liang, T. 2013. Continuous devulcanization of ground tire rubber of different particle sizes using an ultrasonic twin-screw extruder. [Verkkodokumentti]. Diplomityö. The Graduate Faculty of the University of Akron. Akron, USA. [Viitattu 30.3.2015]. Saatavissa: https://etd.ohiolink.edu/rws_etd/document/get/akron1366063285/inline.

Liming Heavy Industry. Hammer mill structure design. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 2.2.2015]. Saatavissa: <http://www.crusherindustry.com/index.php/hammer-mill-structure-design/>.

Lo Presti, D. 2013. Recycled tyre rubber modified bitumens for road asphalt mixtures: A literature review. Construction and building materials. [Verkkolehti]. Vol. 49. S. 863–881. [Viitattu 10.11.2014]. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061813008477>. ISSN 09500618.

Manuel, H. J. & Dierkes, W. 1997. Recycling of rubber. Shawbury, United Kingdom: Rapra Technology Limited. 106 s. ISSN 0889-3144.

Mark, J. E., Erman, B & Eirich, F. R. 2005. Science and technology of rubber. 3rd ed. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Academic Press. 829 s. ISBN 978-0-12-464786-2 (painettu) ISBN 978-0-0804-5601-0 (sähköinen).

Martinez, J. D., Puy, N., Murillo, R., Garcia, T., Navarro, M. V. & Mastral, A. M. 2013. Waste tyre pyrolysis – A review. Renewable and sustainable energy reviews. [Verkkolehti]. Vol. 23. S. 179–213. [Viitattu 12.11.2014]. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113001408>. ISSN 13640321.

Morton, M. 1987. Rubber technology. 3rd ed. New York, USA: Van Nostrand Reinhold Company Inc. 638 s. ISBN 0-442-26422-4.

Motiva. 2014. Henkilöauton päästö määräykset. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 10.3.2015]. Saatavissa: http://www.motiva.fi/liikenne/henkiloautoilu/valitse_auto_viisaasti/henkiloautojen_paas_tomaaraykset.

Nokian Renkaat_a. Sademetsistä kilparatsastusareenalle: Nokian Renkaiden arvoketju [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 10.3.2015]. Saatavissa: <http://www.nokianrenkaat.fi/yritys/vastuullisuus/arvoketju/>.

Nokian Renkaat_b. Tuotantomme toiminta ja turvallisuus. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 1.12.2014]. Saatavissa: <http://www.nokianrenkaat.fi/yritys/vastuullisuus/ymparisto/tuotannon-turvallisuus/>.

Read, K. 2012. Breakdown service. Tyre technology international. [Verkkodokumentti]. October 2012. S. 42–45. [Viitattu 19.3.2015]. Saatavissa: <http://viewer.zmags.com/publication/15772062#/15772062/44>.

Recycling Product News. 2014. Two-shaft shear shredders use quick-change blades. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 25.4.2015]. Saatavissa: <http://www.recyclingproductnews.com/article/19032/two-shaft-shear-shredders-use-quick-change-blades>. Kuva “Segmented blade gx series first India order drawings and pictures cutters segments”.

Rönkkö, S. 2015. Projektitutkija. Tampereen teknillinen yliopisto, materiaaliopin laitos. Tampere, PL 527, 33101 Tampere. Haastattelu 28.5.2015.

Saiwari, S. 2013. Post-consumer tires back into new tires, de-vulcanization and re-utilization of passenger car tires. [Verkkodokumentti]. Väitöskirja. University of Twente. Enschede, The Netherlands. [Viitattu 10.2.2015]. Saatavissa: http://doc.utwente.nl/86036/1/thesis_S_Saiwari.pdf. ISBN 978-90-365-3541-0.

Santagata, E., Dalmazzo, D., Lanotte, M., Zanetti, M. C. & Ruffin, B. 2009. Relationship between crumb rubber morphology and asphalt rubber viscosity. [Verkkodokumentti]. 19 s. [Viitattu 18.6.2015]. Saatavissa: http://www.ra-foundation.org/wp-content/uploads/2013/02/031-PAP_067.pdf.

Schutte-Buffalo Hammermill. How does a hammer mill work? [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 1.2.2015]. Saatavissa: <http://www.hammermills.com/how-does-a-hammer-mill-work>.

Scrap Tyre News. 2015. Crumb rubber information. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 4.2.2015]. Saatavissa: <http://www.scraptirenews.com/crumb.php>.

Seppälä, J. 1997. Polymeeriteknologian perusteet. Espoo, Suomi: Otatieto Oy. 267 s. ISBN 951-672-250-4.

Shulman, V. L. 2004. Tyre recycling. Shrewsbury, United Kingdom: Smithers Rapla. 145 s. ISBN 9781859574898 (painettu) ISBN 9781847352064 (sähköinen).

SID. 2008. SID - Rotary shears. [Verkkodokumentti]. 8 s. [Viitattu 9.1.2015]. Saatavissa: http://www.sidsa.ch/02_e/00_prospekte/e_pdf/SID_Rotary_shears.pdf.

Sienkiewicz, M, Kucinska-Lipka, J, Janik, H & Balas, A. 2012. Progress in used tyres management in the European Union: A review. Waste management. [Verkkolehti]. Vol 32:10. S. 1742–1751. [Viitattu 9.2.2015]. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X1200219X>. ISSN 0956-053X.

Simpson, R. B. 2002. Rubber basics. Shawbury, United Kingdom: Rapra Technology Limited. 212 s. ISBN 9781859573075 (painettu) ISBN 9781859573402 (sähköinen).

Stevenson, K., Stallwood, B. & Hart, A. G. 2008. Tire rubber recycling and bioremediation: A review. Bioremediation journal. [Verkkolehti]. Vol. 12:1. S. 1–11. [Viitattu 6.1.2015]. Saatavissa: http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10889860701866263#.VOTIM-aUe_E. ISSN 1088-9868.

Stokes, D. J. 2009. Principles and practice of variable pressure: environmental scanning electron microscopy (VP-ESEM). Chichester, United Kingdom: Wiley. 235 s. ISBN 9780470065402 (painettu) ISBN 9780470758748 (sähköinen).

Suomen Rengaskierrätys Oy_a. Lainsäädäntö. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 14.2.2015]. Saatavissa: <http://www.rengaskierratys.com/lainsaadanto>.

Suomen Rengaskierrätys Oy_b. Renkaiden vastaanotto ja hyötykäyttö tonneina. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 14.2.2015]. Saatavissa: <http://www.rengaskierratys.com/tilastot>.

Talja, J. 2015. Tekniikan lisensiaatti / teknologiajohtaja. Kuusakoski Oy. Sähköpostikeskustelu 1.7.2015.

Tampereen teknillinen yliopisto. 2015. SEM. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 11.5.2015]. Saatavissa: <http://www.tut.fi/fi/tietoa-yliopistosta/laitokset/materiaalioppi/tutkimus/tutkimuslaitteet/mikroskopia-ja-kuvantaminen/sem/index.htm>.

Thodesen, C., Shatanawi, K. & Amirkhanian, S. 2009. Effect of crumb rubber characteristics on crumb rubber modified (CRM) binder viscosity. Construction and Building Materials. [Verkkolehti]. Vol. 23:1. S. 295-303. [Viitattu 18.6.2015]. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006180700311X>. ISSN 09500618

United States Environmental Protection Agency. 2010. Scrap tires: handbook on recycling applications and management for the U.S. and Mexico. [Verkkodokumentti]. 129 s. [Viitattu 25.6.2015]. Saatavissa: http://www.epa.gov/epawaste/conserve/materials/tires/scrap_tire_handbk_english_ver.pdf. EPA530-R-10-010.

Universe projects international W.L.L. Tire recycling. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 25.3.2015]. Saatavissa: <http://www.universe-projects.com/technologies/tire-recycling/>.

University of Iowa. Liquid nitrogen handling. Environmental Health & Safety. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 10.3.2015]. Saatavissa: <http://ehs.research.uiowa.edu/liquid-nitrogen-handling>.

Unlimited Resources Corporation. 2012. Whole Tire Processing System by Stages to Crumb Rubber. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 16.2.2015]. Saatavissa: <http://www.urcrecycle.com/whole-tire-proprocessing-system-by-stages-to-crumb-rubber/>.

VNp 27.6.2013/527. Valtioneuvoston asetus käytöstä poistettujen renkaiden erilliskeräyksestä ja hyödyntämisestä.

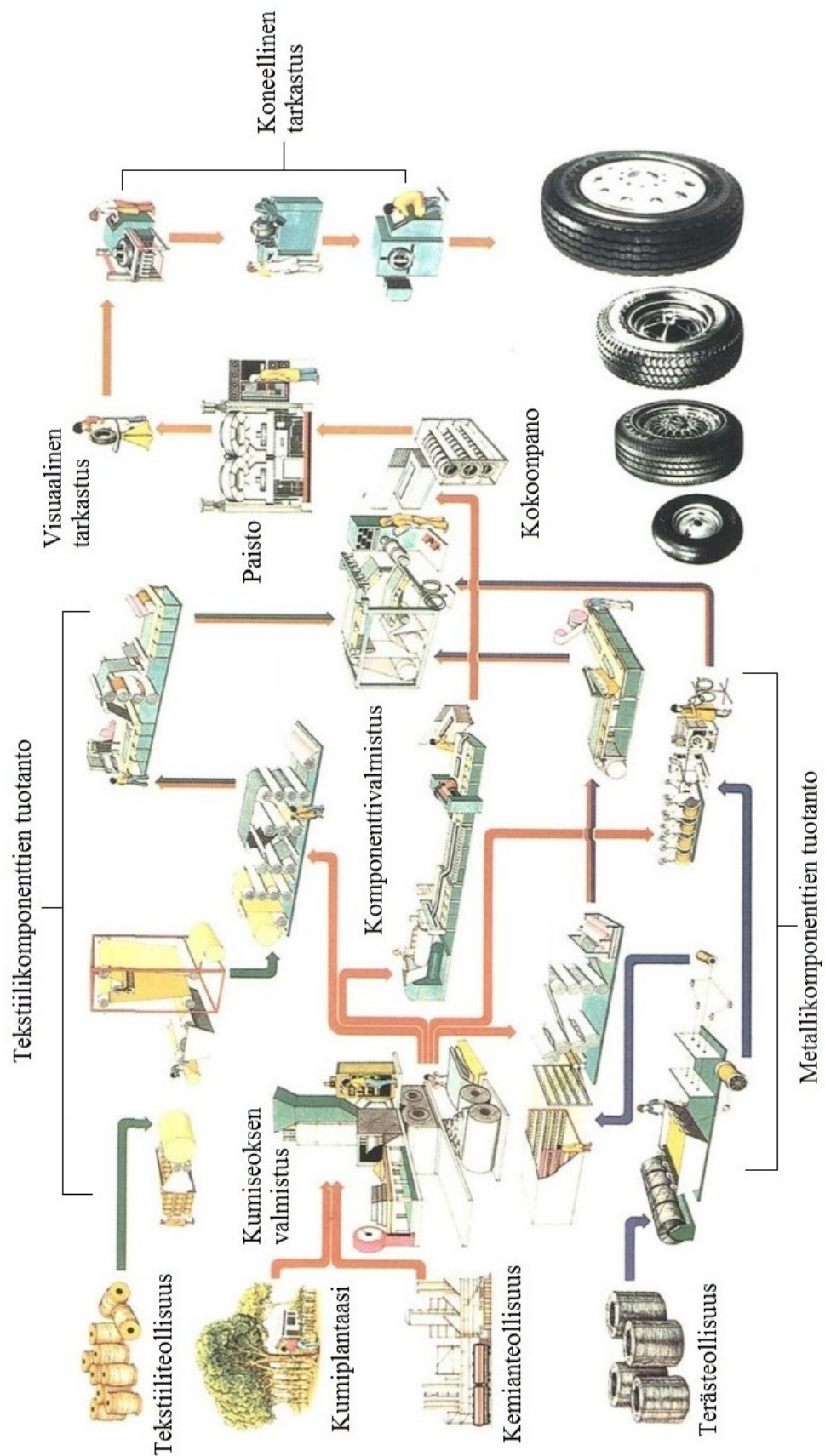
Waste Management World. 2003. Scrap tyre recycling. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 3.3.2015]. Saatavissa: <http://www.waste-management-world.com/articles/2003/07/scrap-tyre-recycling.html>.

Zhu, F-Y., Wang, Q-Q., Zhang, X-S., Hu, W., Zhao, X. & Zhang, H-X. 2014. 3D nanostructure reconstruction based on the SEM imaging principle, and applications. Nanotechnology. [Verkkolehti]. Vol. 25:18. S. 10. [Viitattu 12.5.2015]. Saatavissa: <http://m.iopscience.iop.org/0957-4484/25/18/185705/article>. ISSN 1361-6528.

Liiteluettelo

- Liite 1. Yksityiskohtainen renkaan valmistusprosessikaavio. 1 sivu.
- Liite 2. Laitoksen 1 yleisilmettä. 1 sivu.
- Liite 3. Kumigranulaattien tuotekohtaiset kokojakaumat laitoksella 1. 2 sivua.
- Liite 4. Laitoksen 2 yleisilmettä. 1 sivu.
- Liite 5. Laitosten 1 ja 2 prosessiominaisuuksien vertailu. 1 sivu.

Liite 1. Yksityiskohtainen renkaan valmistusprosessi- kaavio (Erman et al. 2013, 690).



Liite 2. Laitoksen 1 yleisilmettä.

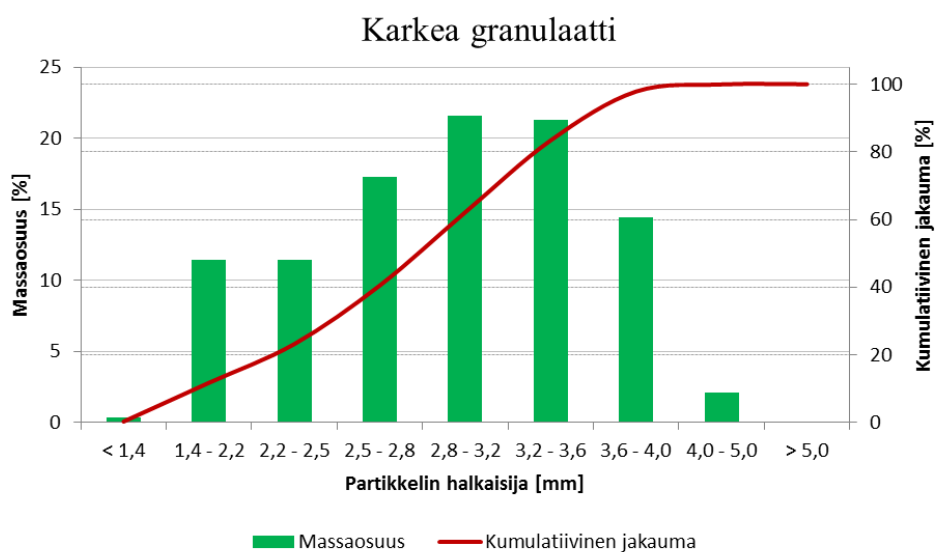
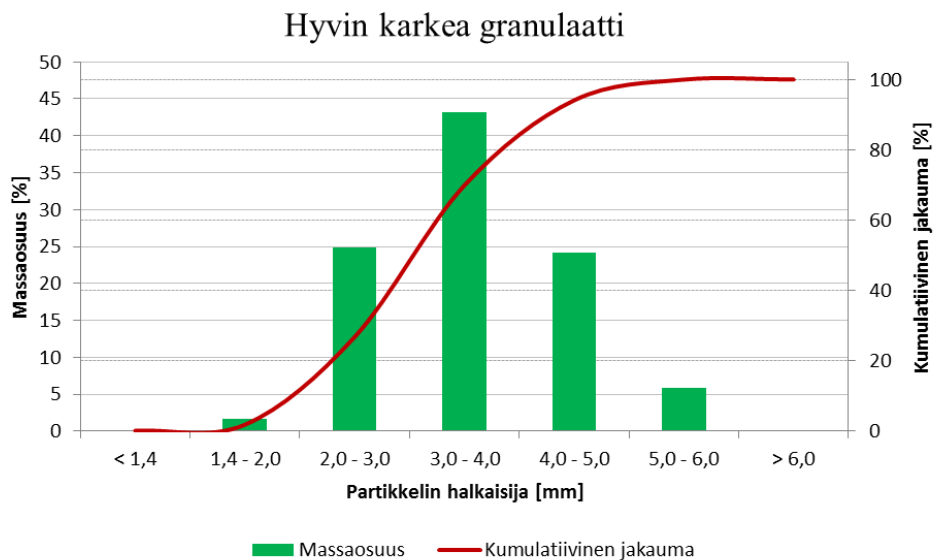


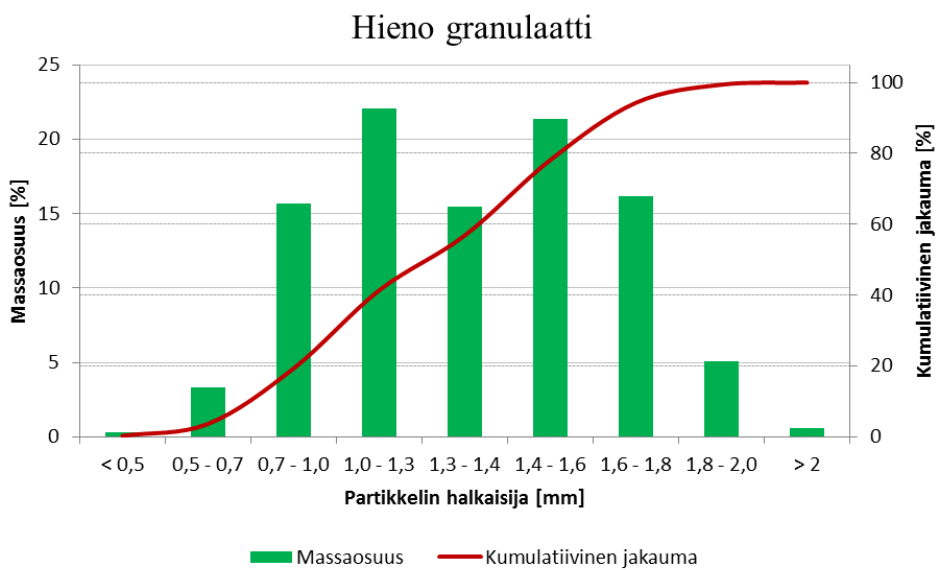
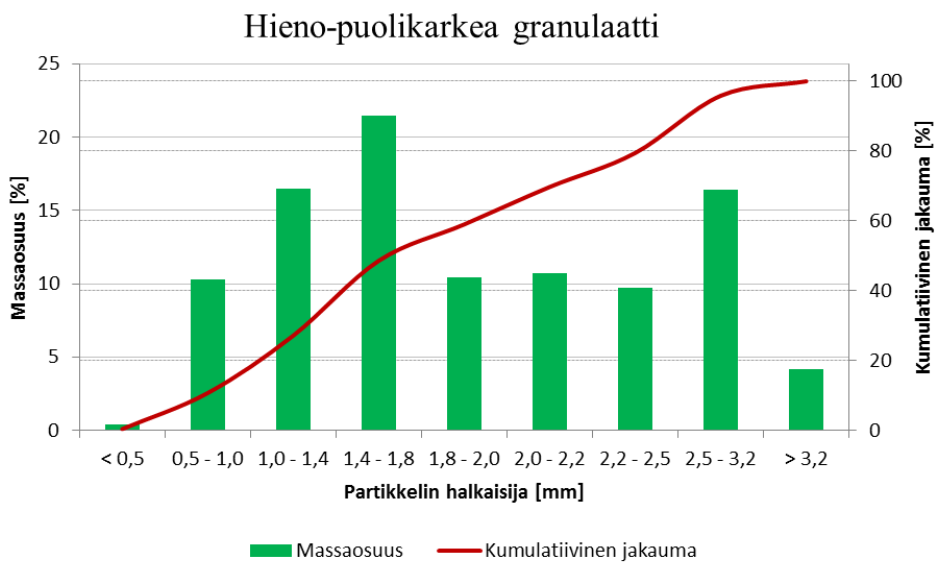
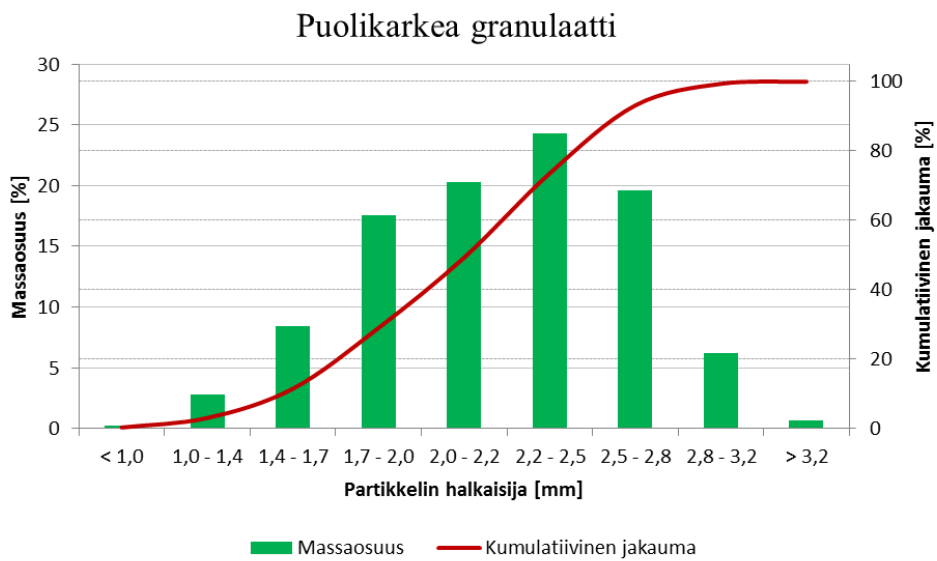
Murskausprosessin alku, renkaiden syöttö primääriprosessointilaitteelle.



Laitos 1 oli yleisilmeeltään siisti, granulaattori 1 kuvan keskellä.

Liite 3. Kumigranulaattien tuotekohtaiset kokojakaumat laitoksella 1.





Liite 4. Laitoksen 2 yleisilmettä.



Primäärinen leikkaava murskain oli sijoitettu katetun rakennuksen ulkopuolelle.



Kumin tuotefraktioiden pakkaaminen prosessin lopussa; kullekin tuotteelle on kaksi säkkiä, joita täytettiin vuorotellen.

Liite 5. Laitosten 1 ja 2 prosessiominaisuuksien vertailu.

Ominaisuus	Laitos 1	Laitos 2
Laitos yleisesti		
Kapasiteetti [t/v]	60 000	20 000–25 000
Prosessin toiminnan automaattisuus	Täysin	Lähes
Toiminta-aika	24/7	24/7
Maksimirenkään halkaisija [mm]	~ 2 000	1 500
Murskausprosessi	Kolmiportainen	Kaksiportainen
Murskaussyksiköiden lukumäärä	14	2
Primääriprosessointilaitteiden lukumäärä	2	1
Sekundääriprosessointilaitteiden lukumäärä	12	1
Puhdistus- ja seulontayksiköiden lukumäärä	Useita	Useita
Murskaimet		
Primääriprosessointilaitte	Leikkaava murskain	
	Yksiroottorinen	Kaksiroottorinen
Primääriprosessointilaitteen kapasiteetti [t/h]	19–25	15
Primääriprosessointilaitteen huoltoväli [h]	~ 800	< 1 000
Primääriprosessointilaitteen energiankulutus [kWh/t]	12–70	~ 10
Sekundääriprosessointilaitte	Granulaattori 1 Granulaattori 2	Kollarimurskain
Sekundääriprosessointilaitteen kapasiteetti [t/h]	3 (granul. 1) 0,3–1 (granul. 2)	3,5
Sekundääriprosessointilaitteen huoltoväli [h]	~ 800	~ 2 000
Sekundääriprosessointilaitteen energiankulutus [kWh/t]	4–6 (granul. 1) 10–33 (granul. 2)	~ 123
Energiankulutus		
Kokonaisenergiankulutus [kWh/t]	451	144
Murskaustoiminnan energiankulutus [kWh/t]	275	133
Muun toiminnan energiankulutus [kWh/t]	176	11